

DB42

湖 北 省 地 方 标 准

DB42/T 1746—2021

超高性能混凝土钢桥面铺装体系技术规程

Code of technical practice for ultra-high performance concrete steel deck
pavement system

2021-08-30 发布

2021-11-01 实施

湖北省市场监督管理局 发布

目 次

前言..... III

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 2

4 材料..... 3

5 结构及构造基本假定..... 6

6 持久状况承载能力极限状态设计..... 8

7 持久状况正常使用极限状态设计..... 18

8 持久状况及短暂状况应力验算..... 20

9 抗剪连接件..... 20

10 构造要求..... 22

11 施工..... 24

12 检验与验收..... 27

附录 A（资料性） UHPC 轴心抗拉强度试验方法..... 31

附录 B（资料性） 开口加劲肋侧扭屈曲的弹性临界弯矩计算..... 34

附录 C（资料性） 损伤等效系数的计算方法..... 36

附录 D（资料性） 疲劳细节和疲劳寿命..... 39

附录 E（资料性） UHPC 名义弯拉应力容许值..... 42

附录 F（资料性） UHPC 层第二、三体系主要关注位置..... 44

附录 G（资料性） 降低 UHPC 层名义拉应力的方法..... 45

条文说明..... 46

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中铁大桥科学研究院有限公司提出。

本文件由湖北省交通运输厅归口。

本文件起草单位：中铁大桥科学研究院有限公司、中铁大桥局集团有限公司、桥梁结构健康与安全国家重点实验室、中铁第四勘察设计院集团有限公司、湖北省标准化与质量研究院。

本文件主要起草人：田启贤、王天亮、彭旭民、周尚猛、侍刚、陈露一、高立强、伍贤智、吴美艳、严爱国、郭福宽、王伟、肖昌量、蔡欣、王朝、周琰、郝聪龙、崔冰、王岩、李鹏程、饶波、王福胜、韩阳昱、陈磊。

本文件为首次发布。

本文件实施应用中的疑问，可咨询湖北省交通运输厅，联系电话：027-83460362，邮箱：hbzjjglc@163.com。对本文件的有关修改意见和建议请反馈至中铁大桥科学研究院有限公司，电话：027-83556197，邮箱qky6197@163.com，地址：武汉市建设大道103号，邮政编码：430034。

超高性能混凝土钢桥面铺装体系技术规程

1 范围

本文件规定了超高性能混凝土钢桥面铺装材料、基本规定、持久状况承载能力极限状态设计、持久状况正常使用极限状态设计、持久状况及短暂状态应力验算、抗剪连接件、构造要求、施工及检验。

本文件适用于采用超高性能混凝土钢桥面铺装体系的桥梁结构，包括新建桥梁和既有桥梁。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 175 通用硅酸盐水泥

GB/T 714 桥梁用结构钢

GB/T 1228 钢结构用高强度大六角头螺栓

GB/T 1229 钢结构用高强度大六角螺母

GB/T 1230 钢结构用高强度垫圈

GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角头螺母、垫圈技术条件

GB/T 1499.2 钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋

GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰

GB/T 3632 钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副

GB 8076 混凝土外加剂

GB/T 8923.1 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级

GB/T 10433 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉

GB/T 13288.2 涂覆涂料前钢材表面处理 喷射清理后的钢材表面粗糙度特性 第2部分：磨料喷射清理后钢材表面粗糙度等级的测定方法 比较样块法

GB/T 14684 建设用砂

GB/T 23439 混凝土膨胀剂

GB/T 31387 活性粉末混凝土

GB/T 50080 普通混凝土拌合物性能试验方法标准

GB/T 50081 混凝土物理力学性能试验方法标准

GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范

GB 50917 钢-混凝土组合桥梁设计规范（附条文说明）

JGJ 63 混凝土用水标准

JG/T 472 钢纤维混凝土

JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件

JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范（附条文说明）

JTG/T D64-01 公路钢混组合桥梁设计与施工规范
JTG D50 公路沥青路面设计规范
JTG D60 公路桥涵设计通用规范
JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范
JTG E30 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程
JTG F40 公路沥青路面施工技术规范
JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程（附条文说明）
TB/T 3275 铁路混凝土
TB 10091 铁路桥梁钢结构设计规范
ISO 8502-1 可溶铁腐蚀产物的现场测试标准
ISO 8502-9 水溶性盐的现场电导测定法标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超高性能混凝土 ultra high performance concrete (UHPC)

超高性能混凝土是指具有超高的力学性能、耐久性能和工作性能，且可有表观应变硬化或软化行为的水泥基复合材料，预混料简称UHPC，其中，按立方体抗压强度标准值的不同可分为UHPC100、UHPC120、UHPC140等，分别代表立方体抗压强度标准值为100MPa、120MPa、140MPa的超高性能混凝土。

3.2

超高性能混凝土钢桥面铺装体系 ultra high performance concrete steel deck pavement system

超高性能混凝土钢桥面铺装体系由桥面结构层和柔性铺装面层组成。

3.3

桥面结构层 bridge deck structure course

桥面结构层由正交异性钢桥面板、UHPC层、栓钉和钢筋网组成，在超高性能混凝土钢桥面铺装体系起承重作用。

3.4

桥面结构下层 bridge deck structure lower course

桥面结构下层为正交异性钢桥面板层。

3.5

桥面结构上层 bridge deck structure upper course

桥面结构上层由UHPC层、栓钉和钢筋网组成。

3.6

面层 surface course

位于超高性能混凝土钢桥面铺装体系顶层的柔性铺装层，为钢桥面铺装体系的磨耗层，简称面层。

3.7

栓钉 shear stud

栓钉又名剪力钉，起到连接正交异性钢桥面板与UHPC层的作用。

3.8

接缝 joint

为满足UHPC在大跨、宽幅桥面上的分块与分幅施工，或满足超高性能混凝土钢桥面铺装体系的节段拼装施工，而在不同施工单元间设置的连接形式。

4 材料

4.1 UHPC

4.1.1 水泥宜采用品质稳定、强度等级不低于 42.5 级的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，其性能应符合 GB 175 的规定。

4.1.2 粉煤灰应符合 GB/T 1596 的规定，硅灰应符合 TB/T 3275 的规定。当采用其它矿物掺合料时，应通过试验进行验证，确定 UHPC 性能满足工程应用要求后方可使用。

4.1.3 骨料应使用 SiO₂ 含量大于 90%、含泥量不大于 0.5% 的石英砂。不同粒级石英砂的超粒径颗粒含量限制值应符合表 1 的规定。

表1 不同粒级石英砂的超粒径颗粒含量

粒级要求	1.25~0.63mm 粒级		0.63~0.315mm 粒级		0.315~0.16mm 粒级	
	≥1.25mm	<0.63mm	≥0.63mm	<0.315mm	≥0.315mm	<0.16mm
质量百分比 (%)	≤5	≤10	≤5	≤10	≤5	≤5

4.1.4 钢纤维性能指标应满足：直径 0.12mm~0.23mm，长度 13mm~17mm，其它性能应符合 JG/T 472 的规定。

4.1.5 减水剂应符合 GB 8076 和 GB 50119 的规定。宜选用高性能减水剂，减水剂的减水率宜大于 30%。

4.1.6 膨胀剂应符合 GB/T 23439 关于 I 型膨胀剂的相关技术要求。

4.1.7 拌合用水应符合 JGJ 63 的规定。

4.1.8 掺用改善拌合物和 UHPC 性能的其它外加剂时，其性能应符合现行国家标准的规定；且应通过试验，确定 UHPC 性能满足工程应用要求后方可使用。

4.1.9 UHPC 立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 、轴心抗压强度标准值 f_{ck} 、轴心抗压强度设计值 f_{cd} 、抗折强度标准值 f_{tk} 、抗折强度设计值 f_{td} 、轴心抗拉强度设计值 f_{td} 应按表 2 取用。

表 2 UHPC 强度等级（MPa）

强度	UHPC 强度等级		
	UHPC100	UHPC120	UHPC140
立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$	100	120	140

表 2 UHPC 强度等级 (MPa) (续)

强度	UHPC 强度等级		
	UHPC100	UHPC120	UHPC140
轴心抗压强度标准值 f_{ck}	61.5	73.9	86.2
轴心抗压强度设计值 f_{cd}	42.4	51.0	59.5
抗折强度标准值 f_{fk}	25	28	32
抗折强度设计值 f_{fd}	17.2	19.3	22.1
轴心抗拉强度设计值 f_{td}	5	6	7

4.1.10 UHPC 的抗剪强度可通过试验确定。当无试验资料时,可按公式(1)计算:

$$\tau_c = \gamma f_{ck} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- τ_c ——UHPC 的抗剪强度 (MPa);
- γ ——计算系数,一般取 0.095~0.121,本规程建议取 0.095;
- f_{ck} ——UHPC 的轴心抗压强度标准值 (MPa)。

4.1.11 UHPC 的抗压、抗拉弹性模量采用 100 mm×100 mm×300 mm 的试件,按 GB/T 50081 和 JTG E30 通过试验确定。当无试验资料时,可按表 3 取值。

表3 不同强度等级UHPC的弹性模量 (GPa)

UHPC 强度等级	UHPC100	UHPC120	UHPC140
抗压、抗拉弹性模量	34.4	37.6	40.7

4.1.12 UHPC 的剪切模量 G_c 可按式(2)计算:

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\mu_c)} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- G_c ——UHPC的剪切模量;
- E_c ——UHPC的抗压/抗拉弹性模量;
- μ_c ——UHPC的泊松比,按照本规程第4.1.13条取值。

4.1.13 UHPC 的泊松比 μ_c 可取为 0.2,温度线膨胀系数 α_c 可取为 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

4.1.14 在自然养护条件下，UHPC 的收缩应变和徐变系数按表 4 取值。

表 4 UHPC 的收缩应变和徐变系数

养护条件	收缩应变（ $\times 10^{-6}$ ）	徐变系数
自然养护（相对湿度 50%~70%）	400	0.8
高温蒸汽养护	0	0.2

4.1.15 钢筋在 UHPC 内的锚固长度的取值应符合以下规定：

- a) 当钢筋达到其屈服强度时，锚固长度为 $6d_r$ ，其中 d_r 为钢筋的公称直径；
- b) 当钢筋达到其极限强度时，锚固长度为 $9d_r$ 。

4.1.16 UHPC 的抗渗压强不低于 2.0MPa。

4.2 钢材

4.2.1 采用超高性能混凝土钢桥面铺装体系的钢主梁钢材的技术条件应符合 GB/T 714 的规定。

4.2.2 钢主梁及连接件使用的高强螺栓应满足：

- a) 高强度螺栓、螺母、垫圈的技术条件应符合 GB/T 1228、GB/T 1229、GB/T 1230、GB/T 1231 和 GB/T 3632 的规定；
- b) 高强度螺栓的预拉力设计值 P_d 应按 TB 10091 的相关规定取用；
- c) 高强度螺栓连接的钢材摩擦面抗滑移系数应大于 0.45。

4.2.3 构件中设置的栓钉应符合 GB/T 10433 中的圆柱头焊钉的相关规定。

4.3 普通钢筋

4.3.1 UHPC 中的普通钢筋可选用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 和 RRB400 钢筋，并应符合 GB/T 1499.2 的规定。

4.3.2 普通钢筋的抗拉强度标准值应具有不小于 95% 的保证率。普通钢筋的抗拉强度标准值 f_{sk} 应按表 5 采用。

表5 钢筋的物理性能指标

钢筋种类	符号	公称直径 d (mm)	f_{sk} (MPa)
HRB400	C	6~50	400
HRBF400	C ^F		
RRB400	C ^R		
HRB500	D	6~50	500
HRBF500	D ^F		

4.3.3 普通钢筋抗拉强度设计值 f_{sd} 和抗压强度设计值 f'_{sd} 应按表 6 采用。

表6 普通钢筋抗拉、抗压强度设计值 (MPa)

钢筋种类	抗拉强度设计值 f_{sd}	抗压强度设计值 f'_{sd}
HRB400	330	330
HRBF400		
RRB400		
HRB500	415	415

注 1: 轴心受拉和小偏心受拉构件的钢筋抗拉强度设计值大于 330MPa 时, 应按 330MPa 取用;

注 2: 构件中配有不同种类的钢筋时, 每种钢筋应采用各自强度的设计值。

4.3.4 普通钢筋的弹性模量 E_r 应按表 7 采用。

表7 普通钢筋的弹性模量 (MPa)

钢筋种类	弹性模量 E_r
HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500、RRB400	2.0×10^5

4.4 面层

4.4.1 面层中磨耗层材料性能应符合现行 JTG D50 的规定。

4.4.2 磨耗层与 UHPC 层间设有防水粘结层, 其材料性能应符合现行规范的规定。

5 结构及构造基本假定

5.1 超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的钢梁指含有正交异性钢桥面板的钢主梁, 钢主梁的形式有钢箱梁、钢桁梁。

5.2 本文件采用以概率理论为基础的极限状态设计方法, 按分项系数的表达式进行设计。

5.3 超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁应对其构件及连接件进行下列验算:

- 按承载能力极限状态的要求进行持久状况及偶然状况的承载力、整体稳定计算;
- 按正常使用极限状态的要求进行持久状况的抗裂性、应力、挠度验算, 以及耐久性设计;
- 按短暂状况结构受力状态的要求进行施工等工况的验算。

5.4 超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁中, 组合桥面板的有效宽度应按照 JTG/T D64-01 的相关规定进行计算。

5.5 超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的温度作用应按下列规定计算:

- 计算超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁由于均匀温度作用引起的外加变形或约束变形时, 应从受到约束时的结构温度开始, 计算环境最高和最低有效温度的作用效应。当缺乏实际调查资料时, 最高和最低有效温度标准值可按 JTG D60 取值, 材料线膨胀系数按照 4.1.13 条的规定取值;
- 计算超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁由于梯度温度引起的效应时, 应采用图 1 所示的竖向

温度梯度分布形式。温度梯度取值按照公式（3）、（4）计算。

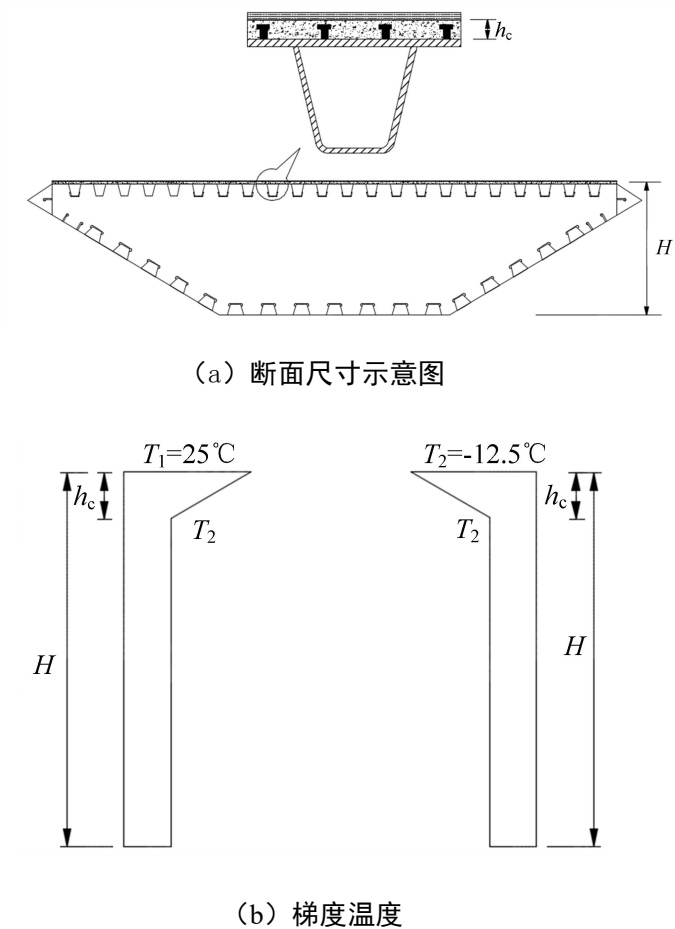


图1 温度梯度计算图示（ h_c ：UHPC层厚度， H ：组合截面全高）

温升时， T_2 按照式（3）计算：

$$T_2 = 25 - \frac{25 - 6.7}{100} h_c \dots\dots\dots (3)$$

式中：

h_c ——UHPC层厚度（mm）

温降时， T_2 按照式（4）计算：

$$T_2 = -12.5 - \frac{-12.5 + 3.3}{100} h_c \dots\dots\dots (4)$$

式中：

h_c ——UHPC层厚度（mm）

- 5.6 超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的设计计算除应符合本文件的规定外，还应符合 JTG D60、JTG/T D64-01、JTG 3362 中的相关规定。
- 5.7 超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的 UHPC 收缩徐变的计算应符合下列规定：

- a) UHPC收缩效应按本规程4.1.14及JTG 3362中的相关规定执行；
- b) UHPC徐变效应按本规程4.1.14执行，在进行整体计算时，可采用调整钢材与UHPC弹性模量比的方法考虑其徐变的影响，按照公式（5）计算。超静定结构UHPC收缩徐变所引起的效应，可采用有限元方法计算。

$$n_L = n_0[1 + \psi_L \phi(t, t_0)] \dots\dots\dots (5)$$

式中：

n_L ——长期弹性模量比；

n_0 ——短期荷载作用下钢与UHPC的弹性模量比， $n_0 = E_s / E_c$ ；

E_c ——UHPC弹性模量；

E_s ——钢材弹性模量；

$\phi(t, t_0)$ ——加载龄期为 t_0 ，计算龄期为 t 时UHPC的徐变系数；

ψ_L ——根据作用（或荷载）类型确定的徐变因子，永久作用取1.1，UHPC收缩作用取0.55，由强迫变形引起的预应力作用取1.5。

5.8 面层设计可按 JTG D50 的相关规定实施。

6 持久状况承载能力极限状态设计

6.1 一般规定

6.1.1 超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的设计使用年限不应低于表 8 的规定，其中超高性能混凝土钢桥面铺装结构应与主体结构等寿命。

表8 公路桥梁结构设计使用年限（年）

公路等级	特大桥 大桥	中桥	小桥
高速公路 一级公路	100	100	50
二级公路 三级公路	100	50	50
四级公路	100	50	30

注：表中所列特大、大、中桥等均按JTG D60中的单孔跨径确定，对于多跨不等跨桥梁，以其中最大跨径为准。

6.1.2 超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的安全等级应根据结构的重要性、结构破坏可能产生的严重性按表 9 取用。

表9 公路桥梁结构设计安全等级

设计安全级别	破坏后果	适用对象
一级	很严重	(1) 各等级公路上的特大桥、大桥、中桥； (2) 高速公路、一级公路、二级公路、国防公路及城市附近交通繁忙公路上的小桥。
二级	严重	三、四级公路上的小桥

6.1.3 超高性能混凝土钢桥面铺装体系的承载能力极限状态计算应采用式（6）计算：

$$\gamma_0 S_{ud} \leq R \dots\dots\dots (6)$$

式中：
 γ_0 ——桥梁的重要性系数，对应于设计安全等级一级、二级的超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁应分别取不小于 1.1、1.0；
 S_{ud} ——作用效应的组合设计值，对于汽车荷载效应应计入冲击系数；
 R ——构件承载能力设计值。

- 6.1.4 当对超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁进行截面承载力、整体稳定和抗剪连接件承载力计算时，作用（或荷载）的效应组合应采用 JTG D60 的基本组合；当进行倾覆稳定计算和疲劳验算时，作用的效应组合应采用标准组合。
- 6.1.5 超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的耐久性应符合 GB 50917 的有关规定。
- 6.1.6 超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的抗倾覆稳定计算应按照 JTG D64 中相关条文进行。

6.2 抗弯承载力计算

- 6.2.1 在计算超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁受力时，应考虑施工方法和顺序的影响，并对施工阶段进行抗弯验算，施工阶段组合效应应符合 JTG D60 的规定。
- 6.2.2 采用弹性设计方法计算超高性能混凝土钢桥面铺装体系的抗弯承载能力，以截面上任意一点达到材料强度设计值为抗弯承载力的标志，钢梁和 UHPC 层应分别符合下列规定：

a) 钢梁按式（7）计算：

$$\sigma_c = \frac{M_{d,I}}{W_{eff,I}} + \frac{M_{d,II}}{W_{eff,II}} \dots\dots\dots (7)$$

式中：
 $M_{d,I}$ ——形成超高性能混凝土钢桥面铺装体系前的弯矩设计值（N·mm）；
 $M_{d,II}$ ——形成超高性能混凝土钢桥面铺装体系后弯矩设计值增量（N·mm）；
 $W_{eff,I}$ ——钢梁的抗弯模量（mm³）；
 $W_{eff,II}$ ——超高性能混凝土钢桥面铺装体系的抗弯模量（mm³）。

b) UHPC 层按式（8）计算：

$$\sigma_s = \frac{M_{d,II}}{W_{eff,II}} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$M_{d,II}$ ——形成超高性能混凝土钢桥面铺装体系后弯矩设计值增量 (N·mm)；

$W_{eff,II}$ ——超高性能混凝土钢桥面铺装体系的抗弯模量 (mm³)。

c) 钢梁和 UHPC 层应分别满足式 (9)：

$$\gamma_0 \sigma \leq f \dots\dots\dots (9)$$

式中：

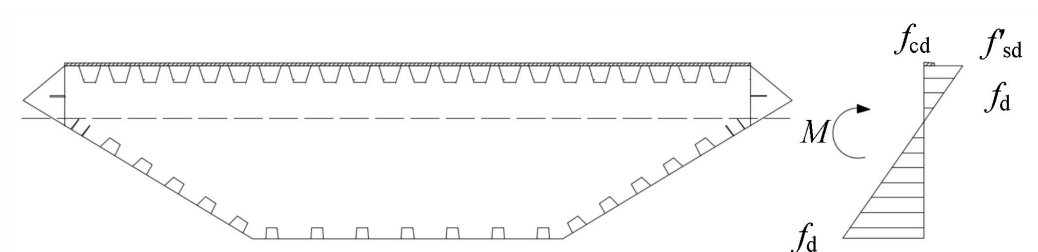
f ——钢梁或钢筋、UHPC 的强度设计值 (MPa)；

γ_0 ——桥梁结构重要性系数，按本规程第 6.1.1、第 6.1.2 条和第 6.1.3 条的规定取值。

6.2.3 超高性能混凝土钢桥面铺装体系的抗弯承载力计算应考虑剪力滞效应影响。

6.2.4 当 UHPC 层与钢梁处于共同受力阶段时，抗弯承载力应按图 2 计算，满足下列任何一个条件时的弯矩值 M_d/γ_0 可作为该体系的抗弯承载力：

- a) UHPC 压应力达到 f_{cd} ；
- b) 钢筋的压应力达到 f'_{sd} ；
- c) 钢梁的拉应力或压应力达到 f_d 。



标引序号说明：

γ_0 ——桥梁的重要性系数，按本规程第6.1.1、第6.1.2条和第6.1.3条的规定取值；

M_d ——正弯矩设计值 (N·mm)；

f_{cd} ——UHPC 的抗压强度设计值 (MPa)；

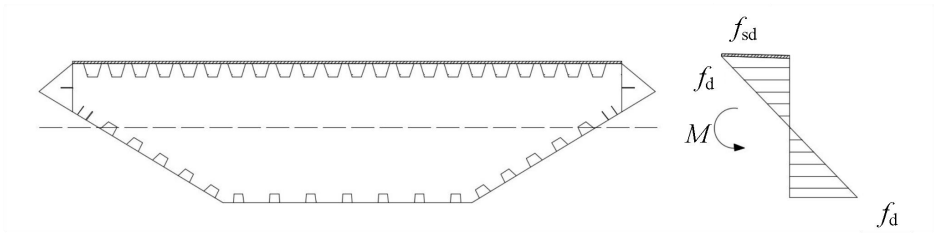
f'_{sd} ——钢筋的抗压强度设计值 (MPa)；

f_d ——钢材的抗拉或抗压强度设计值 (MPa)。

图2 正弯矩作用下超高性能混凝土钢桥面铺装体系及应力图形

6.2.5 容许 UHPC 层开裂，不计入 UHPC 层对抗弯承载力的贡献，计入钢筋对抗弯承载力的贡献。当 UHPC 层与钢梁处于共同受力阶段时，抗弯承载力应按图 3 计算，满足下列任何一个条件时的弯矩值 M_d/γ_0 可作为该体系的抗弯承载力：

- a) 钢筋的拉应力达到 f_{sd} ；
- b) 钢梁的拉应力或压应力达到 f_d ；



标引序号说明：
 f_{sd} ——钢筋的抗拉强度设计值（MPa）。

图 3 负弯矩作用下超高性能混凝土钢桥面铺装体系及应力图形

6.3 抗剪承载力验算

6.3.1 超高性能混凝土钢桥面铺装体系的抗剪承载力可采用下式（10）计算。

$$\gamma_0 V_{vd} \leq V_{vu} = f_{vd} A_w \dots\dots\dots (10)$$

式中：
 V_{vd} ——竖向剪力设计值（N）；
 V_{vu} ——竖向抗剪承载力（mm）；
 A_w ——钢主梁腹板的截面面积（mm）；
 f_{vd} ——钢梁腹板的抗剪强度设计值（MPa）。

6.3.2 超高性能混凝土钢桥面铺装体系承受弯矩和剪力共同作用时，应按下列式（11）验算腹板最大折算应力：

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq 1.1 f_d \dots\dots\dots (11)$$

式中：
 σ 、 τ ——钢主梁腹板计算高度边缘同一点产生的正应力、剪应力（MPa）；
 f_d ——钢材抗拉强度设计值（MPa）。

6.4 整体稳定计算

6.4.1 主梁整体稳定计算应符合下列规定：

- a) 应考虑施工方法和顺序的影响，分别考虑UHPC硬化前钢主梁的整体稳定性和形成超高性能混凝土钢桥面铺装体系后主梁的整体稳定性；
- b) 对于钢主梁的整体稳定性按照JTG D64的相关规定计算；
- c) 对于形成超高性能混凝土钢桥面铺装体系后主梁的整体稳定性按照JTG/T D64-01的相关规定计算。

6.4.2 由钢桥面板、加劲肋和 UHPC 层形成的桥面结构无需进行整体稳定性计算的情况：

- a) 在超高性能混凝土钢桥面铺装体系中，当受正弯矩作用时，超高性能混凝土钢桥面铺装体系中桥面结构无需进行整体稳定性验算；
- b) 在超高性能混凝土钢桥面铺装体系中，当受负弯矩作用时，钢桥面板的纵向加劲肋采用闭口

肋时，无须进行整体稳定计算；

- c) 在超高性能混凝土钢桥面铺装体系中，当受负弯矩作用时，当加劲肋为开口肋时（如倒T型钢、角钢等形式），若开口纵向加劲肋受压翼缘的自由长度 l_1 与其总宽度 b_1 的比值不超过表10规定的数值时，无须进行整体稳定计算。

表10 开口纵向加劲肋不需要计算稳定的最大 l_1/b_1 值

钢种	跨中无侧向支承点的梁	跨中有侧向支承点的梁
Q345q、Q345	10.5	13.0
Q370q、Q390	10.0	12.5
Q420q、Q420	9.5	12.0

注1: l_1 为受压翼缘侧向支点间的距离，即两道相邻横隔板的间距；

注2: b_1 为开口纵向加劲肋受压翼板的宽度。

6.4.3 当不满足 6.4.2 条无需验算的条件时，超高性能混凝土钢桥面铺装体系需要进行整体稳定计算，可参考 GB 50917 相关规定，其整体稳定可按下列公式（12）、（13）、（14）、（15）、（16）进行计算：

$$\gamma_0 M_d \leq \chi_{LT} M_{Rd} \dots\dots\dots (12)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ 且 } \chi_{LT} \leq 1.0 \dots\dots\dots (13)$$

$$\phi_{LT} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \dots\dots\dots (14)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{Rk}}{M_{cr}}} \dots\dots\dots (15)$$

$$M_{Rk} = f_y W_n \dots\dots\dots (16)$$

式中：

M_d ——超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥面结构的弯矩设计值（N·mm）；

M_{Rd} ——超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥面结构的抗弯承载力（N·mm）；

χ_{LT} ——超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥面结构侧扭屈曲的折减系数；

ϕ_{LT} ——计算过程中简写符号；

$\bar{\lambda}_{LT}$ ——换算长细比；

α_{LT} ——缺陷系数，应按表11和表12取值；

M_{Rk} ——采用材料强度标准值计算的桥面结构的截面抗弯承载力（N·mm）；

M_{cr} ——超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥面结构的侧扭屈曲弹性临界弯矩（N·mm），可按附录B 进行计算；

f_v ——钢材的屈服强度（MPa）；
 W_n ——超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥面结构的净截面模量（ mm^3 ）。

表11 缺陷系数 α_{LT}

屈曲曲线类型	a	b	c	d
缺陷系数 α_{LT}	0.21	0.34	0.49	0.76

表12 侧向失稳曲线分类

横截面形式	屈曲方向	屈曲曲线类型
轧制 I 形截面	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
焊接 I 形截面	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
其它截面	—	d

6.5 疲劳验算

- 6.5.1 承受车辆荷载的结构构件与连接，应按疲劳细节类别进行疲劳验算。
- 6.5.2 针对不同桥梁构件类型和设计目的，分别按照 JTG D64 中疲劳荷载计算模型 I、II、III 进行验算：
- a) 疲劳荷载模型 I 用于验算整体受力构件是否具有无限疲劳寿命；
 - b) 疲劳荷载模型 II 用于验算整体受力构件在设计使用期内的安全性；
 - c) 疲劳荷载模型 III 用于验算局部受力构件在设计使用期内的安全性。
- 6.5.3 疲劳荷载应符合下列规定：
- a) 疲劳荷载计算模型 I 采用等效的车道荷载，集中荷载为 $0.7P_k$ ，均布荷载为 $0.3q_k$ 。 P_k 和 q_k 按公路 I 级车道荷载标准取值；应考虑多车道的影响，横向车道布载系数应按 JTG D60 的相关规定选用；
 - b) 疲劳荷载计算模型 II 采用双车模型，两辆模型车轴距与轴重相同，其单车的轴重和轴距布置如图 4 所示。加载时，两模型车的中心距不得小于 40 m；

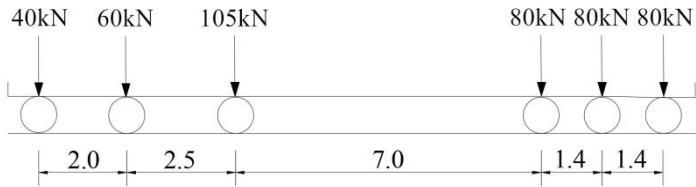


图4 疲劳荷载计算模型 II 的轴重和轴距布置图（尺寸单位：m）

- c) 疲劳荷载计算模型 III 采用单车模型，模型车轴载及分布规定如图 5 所示；

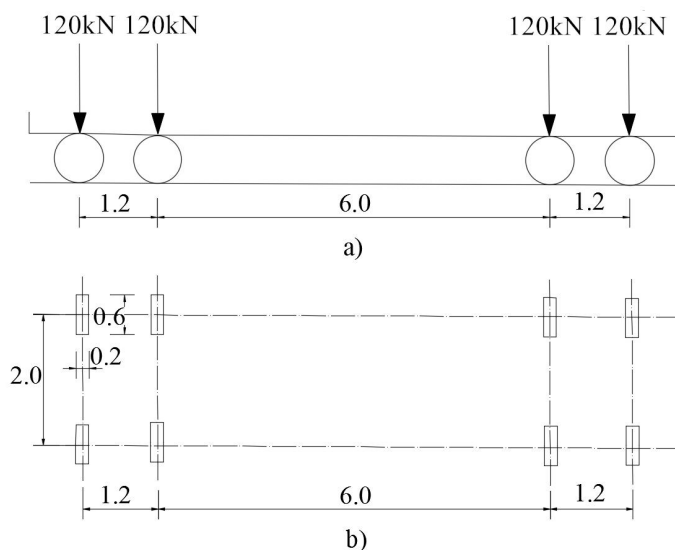


图5 疲劳荷载计算模型Ⅲ的轴重和轴距布置图（尺寸单位：m）

d) 当构件和连接不满足疲劳荷载模型 I 验算要求时，应按模型 II 验算；

e) 桥面系构件应采用疲劳荷载计算模型Ⅲ验算。

6.5.4 验算伸缩缝附近构件时，疲劳荷载应乘以额外的放大系数，放大系数 $\Delta\varphi$ 应按式 (17) 取值。

$$\Delta\varphi = \begin{cases} 0.3(1 - \frac{D}{6}) & (D \leq 6) \\ 0 & (D > 6) \end{cases} \quad (17)$$

式中：

D ——验算截面到伸缩缝的距离（m）。

6.5.5 采用疲劳荷载计算模型 I 时应按下列公式 (18)、(19)、(20)、(21) 验算：

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_p \leq \frac{k_s \Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} \quad (18)$$

$$\gamma_{Ff} \Delta\tau_p \leq \frac{\Delta\tau_L}{\gamma_{Mf}} \quad (19)$$

$$\Delta\sigma_p = (1 + \Delta\varphi)(\sigma_{pmax} - \sigma_{pmin}) \quad (20)$$

$$\Delta\tau_p = (1 + \Delta\varphi)(\tau_{pmax} - \tau_{pmin}) \quad (21)$$

式中：

γ_{Ff} ——疲劳荷载分项系数，取1.0；

γ_{Mf} ——疲劳抗力分项系数，对重要构件取1.35，对次要构件取1.15；

k_s ——尺寸效应折减系数，取 $k_s=1.0$ ；

$\Delta\sigma_p$ 、 $\Delta\tau_p$ ——按疲劳荷载计算模型 I 计算得到的正应力幅和剪应力幅（MPa）；

$\Delta\phi$ ——放大系数，按本文件第6.5.4条的规定取值；

$\Delta\sigma_D$ ——正应力常幅疲劳极限（MPa），根据附录D中对应的细节类别取用；

σ_{pmax} 、 σ_{pmin} ——将疲劳荷载模型按最不利情况加载于影响线得出最大和最小正应力（MPa）；

τ_{pmax} 、 τ_{pmin} ——将疲劳荷载模型按最不利情况加载于影响线得出最大和最小剪应力（MPa）。

6.5.6 采用疲劳荷载计算模型 II 时应按下列公式（22）、（23）、（24）、（25）验算：

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E2} \leq \frac{k_s\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \dots\dots\dots (22)$$

$$\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E2} \leq \frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf}} \dots\dots\dots (23)$$

$$\Delta\sigma_{E2} = (1 + \Delta\phi)\gamma(\sigma_{pmax} - \sigma_{pmin}) \dots\dots\dots (24)$$

$$\Delta\tau_{E2} = (1 + \Delta\phi)\gamma(\tau_{pmax} - \tau_{pmin}) \dots\dots\dots (25)$$

式中：

$\Delta\sigma_C$ 、 $\Delta\tau_C$ ——疲劳细节类别（MPa），为对应200万次常幅疲劳循环的疲劳应力强度；依据附录D和图8、图9取用；

$\Delta\sigma_{E2}$ 、 $\Delta\tau_{E2}$ ——按200万次常幅疲劳循环换算得到的等效常值应力幅（MPa）；

γ ——损伤等效系数， $\gamma = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \cdot \gamma_4$ ，且 $\gamma \leq \gamma_{max}$ ，各参数按附录C取值。

6.5.7 采用疲劳荷载计算模型 III 时应按下列公式（26）、（27）、（28）、（29）、（30）验算。

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E2} \leq \frac{k_s\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \dots\dots\dots (26)$$

$$\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E2} \leq \frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf}} \dots\dots\dots (27)$$

$$\left(\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E2}}{k_s\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E2}}{k_s\Delta\tau_C/\gamma_{Mf}}\right)^5 \leq 1.0 \dots\dots\dots (28)$$

$$\Delta\sigma_{E2} = (1 + \Delta\phi)\gamma(\sigma_{pmax} - \sigma_{pmin}) \dots\dots\dots (29)$$

$$\Delta\tau_{E2} = (1 + \Delta\phi)\gamma(\tau_{pmax} - \tau_{pmin}) \dots\dots\dots (30)$$

6.5.8 在计算正交异性钢桥面板应力时，应考虑车轮在车道上的横向分布，见图6所示。

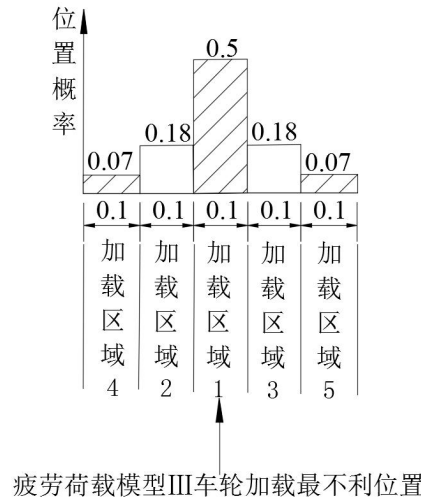


图6 疲劳荷载模型Ⅲ中心线横桥向分布概率（单位：m）

6.5.9 进行疲劳验算时,应采用名义应力法或热点应力法,其中 UHPC 层的疲劳验算应采用名义应力法,钢主梁的疲劳验算宜采用热点应力法,当某些疲劳细节不适合采用热点应力法时,宜采用名义应力法。

6.5.10 热点应力计算方法宜采用表面应力外推法,根据离焊趾适当远处点的板表面应力,采用外推法得到焊趾处的热点应力,如图 7 所示。

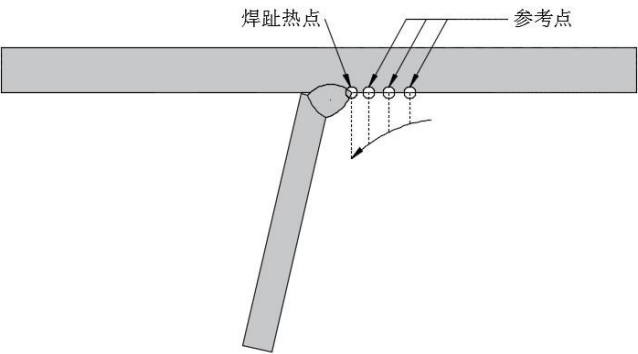


图 7 焊趾附近板垂直焊缝方向应力的变化

对于位于板件表面的 a 类热点来说,采用外推公式 (31) 进行热点应力外推。

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \dots\dots\dots (31)$$

式中:

- σ_{hs} ——热点应力 (MPa) ;
- $\sigma_{0.4t}$ ——距离热点 0.4 倍板厚处应力 (MPa) ;
- $\sigma_{1.0t}$ ——距离热点 1.0 倍板厚处应力 (MPa) 。

对于位于板件边缘的 b 类热点来说,建议采用距离热点 4mm、8mm、12mm 的三个节点进行外推,如公式 (32) 所示。

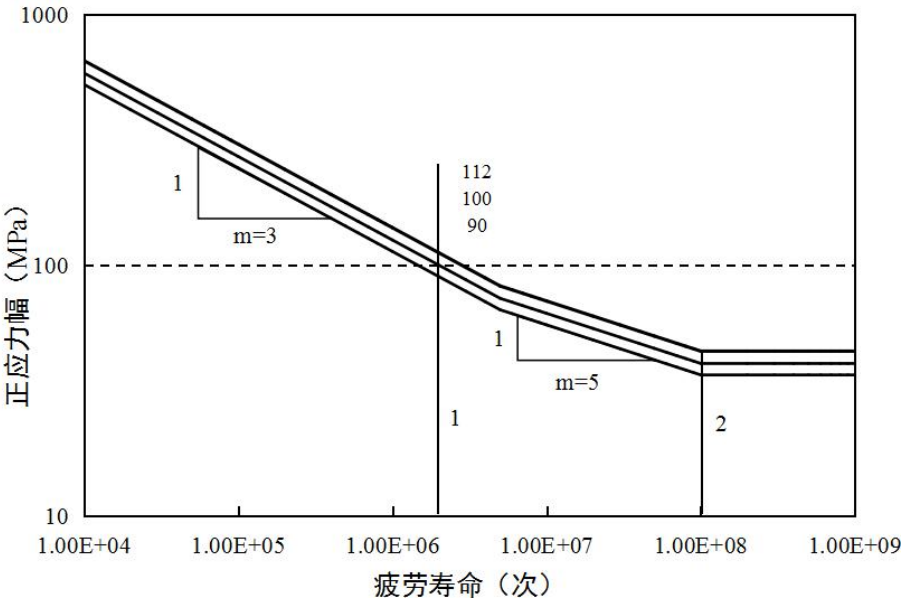
$$\sigma_{hs} = 3\sigma_{4mm} - 3\sigma_{8mm} + \sigma_{12mm} \dots\dots\dots (32)$$

式中：

- $\sigma_{4\text{mm}}$ ——距离热点4mm处应力（MPa）；
- $\sigma_{8\text{mm}}$ ——距离热点8mm处应力（MPa）；
- $\sigma_{12\text{mm}}$ ——距离热点12mm处应力（MPa）。

6.5.11 UHPC 层的疲劳强度按 0.5 倍各等级配筋 UHPC（含接头）的静力名义弯拉应力容许值计算，其疲劳细节分类见附录 D。

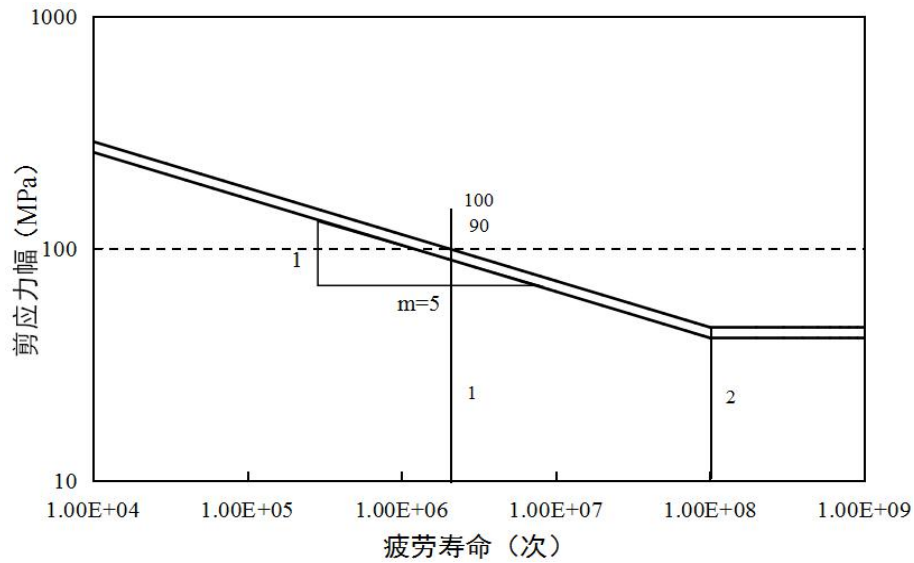
6.5.12 钢梁的疲劳强度以一系列的 $\log \Delta \sigma_R - \log N$ 曲线（图 8）和 $\log \Delta \tau_R - \log N$ 曲线（图 9）组成，也称为 $S - N$ 曲线，每条曲线都对应不同的疲劳强度等级。每个疲劳强度等级由 200 万次疲劳循环对应的疲劳强度 $\Delta \sigma_c$ 和 $\Delta \tau_c$ 定义。



标引序号说明：

- 1——表示疲劳强度等级 $\Delta \sigma_c$ ；
- 2——表示变幅疲劳截止限 $\Delta \sigma_L$ 。

图8 钢梁疲劳强度等级（正应力幅）



标引序号说明：

1——表示疲劳强度等级 $\Delta\tau_c$ ；

2——表示变幅疲劳截止限 $\Delta\tau_L$ 。

图9 钢梁疲劳强度等级（剪应力幅）

7 持久状况正常使用极限状态设计

7.1 一般规定

7.1.1 超高性能混凝土钢桥面铺装体系的正常使用极限状态验算应采用公式（33）进行：

$$S_{sd} \leq C \dots\dots\dots (33)$$

式中：

S_{sd} ——正常使用极限状态作用（或荷载）组合的效应设计值；

C ——结构构件达到正常使用要求所规定的变形、应力和裂缝宽度的限值。

- 7.1.2 超高性能混凝土钢桥面铺装体系的正常使用极限状态应符合下列规定：
- a) 对UHPC层抗裂验算及挠度验算，作用（或荷载）应采用JTG D60中短期效应组合，汽车荷载效应可不计冲击系数；
 - b) 挠度及应力计算应考虑施工顺序的影响；
 - c) 对连续梁等超静定结构，尚应计入由UHPC层收缩、徐变、基础不均匀沉降以及温度变化等引起的次效应。
- 7.1.3 超高性能混凝土钢桥面铺装体系弹性阶段的计算可采用下列基本假定：
- a) 钢与UHPC层均为理想线弹性体；
 - b) 铺装体系弯曲时，UHPC层与钢主梁形成的组合截面符合平截面假定，材料服从虎克定律。
- 7.1.4 为了便于分析，超高性能混凝土钢桥面铺装体系的设计计算可分成三个基本结构体系进行计算：

- a) 第一体系：由UHPC层、顶板和纵肋组成的结构体系看成是主梁（桥梁主要承载构件）的一个组成部分，参与主梁共同受力，称为主梁体系；
- b) 第二体系：由纵肋、横肋、顶板和UHPC层组成的结构体系，将UHPC层和顶板作为纵肋、横肋上翼缘的一部分。第二结构体系起到了桥面系结构的作用，把桥面上的荷载传递到主梁和刚度较大的横梁，称为桥面体系；
- c) 第三体系：把设置在肋上的顶板和UHPC层看成各向同性的连续板，这个板直接承受作用在肋间的轮载，同时把轮载传递到肋上，称为盖板体系。

其中第一体系为总体荷载效应，第二和第三体系为局部荷载效应。超高性能混凝土钢桥面铺装体系的计算结果可以通过各体系计算结果叠加得到。

超高性能混凝土钢桥面铺装体系计算宜采用有限元分析的方法。第一体系可采用梁单元建立整体模型，第二、三体系可以建立在一个局部模型中，各部件以板壳单元或实体单元建立。对两种模型的计算结果进行叠加，即可得到结构的实际受力状态。在局部有限元模型中，应确保网格划分合理。

7.1.5 在本节中未涉及的内容应符合 JTG D60、JTG 3362、JTG/T D64-01、GB 50917 中桥梁设计计算相关条文的规定。

7.2 UHPC 层抗裂验算

7.2.1 超高性能混凝土钢桥面铺装体系中 UHPC 层顶面的最大裂缝宽度限值为 0.05mm。

7.2.2 UHPC 层抗裂验算通过控制短期效应组合下的名义弯拉应力来进行，当名义弯拉应力不大于附录 E 中表 E.1 列出的名义弯拉应力容许值时，即认为 UHPC 层顶面最大裂缝宽度不大于 0.05mm。

7.2.3 当施工中需要对 UHPC 层进行分跨、分幅或分段浇筑时，必须在先浇-后浇连接部位设置接缝。接缝处 UHPC 层抗裂验算也通过控制短期效应组合下的名义弯拉应力来进行，当名义弯拉应力不大于附录 E 中表 E.2 列出的名义弯拉应力容许值时，即认为接缝处 UHPC 层顶面最大裂缝宽度不大于 0.05mm。

7.2.4 根据超高性能混凝土钢桥面铺装体系的受力特点，各构件的应力验算需要考虑第一体系效应与第二、三体系效应的叠加：

- a) 在第一体系效应计算中，弯矩作用下 UHPC 层及钢主梁法向应力可按下列公式 (34)、(35) 计算：

$$\sigma_c = \frac{M_k}{n_0 I_{un}} y_c \dots\dots\dots (34)$$

$$\sigma_s = \frac{M_k}{I_{un}} y_s \dots\dots\dots (35)$$

式中：

σ_c ——UHPC层顶面应力 (MPa)；

M_k ——截面弯矩值 (N·mm)；

n_0 ——钢材弹性模量与UHPC弹性模量的比值， $n_0 = E_s/E_c$ ；

I_{un} ——超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁组合截面的换算惯性矩 (mm⁴)；

σ_s ——钢主梁下翼缘应力 (MPa)；

y_c ——UHPC层顶面至组合截面弹性中性轴的距离 (mm)；

y_s ——钢主梁下翼缘至组合截面弹性中性轴的距离 (mm)。

- b) 在第二、三体系效应计算中,宜建立有限元模型进行计算。UHPC 层中的应力计算应关注峰值应力,且应重点关注 UHPC 层在负弯矩区的拉应力,如附录 F 所示。

7.3 挠度验算

7.3.1 超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的整体挠度应符合 JTG D64 的相关规定。

7.3.2 在车辆荷载作用下,超高性能混凝土钢桥面铺装体系中局部挠跨比 D/L 不应大于 $1/1500$,局部挠跨比如图 10 所示。

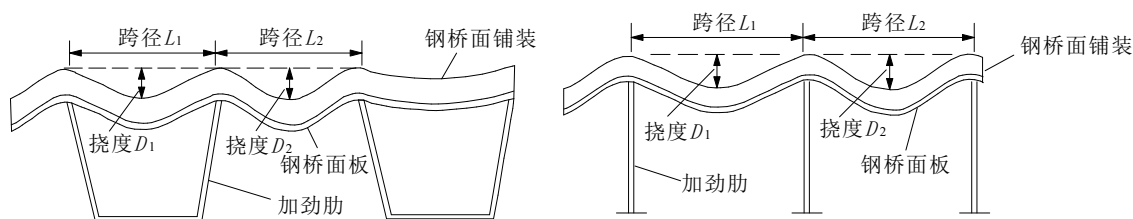


图 10 超高性能混凝土钢桥面铺装体系中局部挠跨比

8 持久状况及短暂状况应力验算

8.1 持久状况构件的应力验算

8.1.1 进行持久状况构件应力计算时,作用(或荷载)取其标准值,车辆荷载应考虑冲击系数。构件应力计算应计入施工顺序的影响。对于连续梁等超静定结构,应计入温度作用、支座沉降等引起的次效应。

8.1.2 计算超高性能混凝土钢桥面铺装体系中构件应力按本规程第 7.2.4 条规定计算。

8.1.3 持久状况下,超高性能混凝土钢桥面铺装体系的应力验算应符合下列规定:

- UHPC 层正截面的最大压应力不宜大于 $0.50 f_{ck}$;
- 钢结构应力不应大于 75% 的强度设计值,且应满足稳定的要求。

8.2 短暂状况构件的应力验算

8.2.1 超高性能混凝土钢桥面铺装体系按短暂状况设计时,应计算构件在制作、运输及安装等施工阶段由自重、施工荷载引起的应力,并不应超过本节规定的限制。施工荷载除有特别规定外,均采用标准值,当有组合时不考虑荷载组合系数。温度作用可按施工时实际温度场取值。

8.2.2 当进行构件运输和安装计算时,构件自重应乘以动力系数。动力系数应按 JTG D60 的规定取用。

8.2.3 计算超高性能混凝土钢桥面铺装体系中构件应力按本规程第 7.2.3 条和第 7.2.4 条规定计算,并考虑施工顺序的影响。

8.2.4 短暂状况下,超高性能混凝土钢桥面铺装体系的应力验算应符合下列规定:

- UHPC 层正截面的最大压应力不宜大于 $0.70 f_{ck}$;
- 钢结构应力不应大于 80% 的强度设计值,且应满足稳定的要求。

9 抗剪连接件

9.1 一般规定

9.1.1 超高性能混凝土钢桥面铺装体系中抗剪连接件的选用应保证 UHPC 层与钢主梁能有效地组合和共同承担荷载作用。

9.1.2 超高性能混凝土钢桥面铺装体系中抗剪连接件宜采用栓钉，也可采用有可靠依据的其它类型连接件。

9.1.3 抗剪连接件应能抵抗 UHPC 层和钢主梁之间的水平剪力和掀起作用，并对结合面上的纵横向水平剪力进行验算：

- a) 超高性能混凝土钢桥面铺装体系在承载能力极限状态下，抗剪连接件应按照下式 (36) 进行抗剪验算：

$$\gamma_0 V_{\text{sud}} \leq V_u \dots\dots\dots (36)$$

式中：

V_{sud} ——承载能力极限状态下单个连接件承担的剪力设计值 (N)；

V_u ——单个连接件的抗剪承载力 (N)；

γ_0 ——桥梁结构重要性系数，按本规程第6.1.1条和第6.1.2的规定取值。

- b) 超高性能混凝土钢桥面铺装体系在正常使用极限状态下，连接件抗剪验算应满足下式 (37) 要求。

$$S_{\text{max}} \leq S_{\text{lim}} \dots\dots\dots (37)$$

式中：

S_{max} ——正常使用极限状态下结合面的最大滑移值 (mm)；

S_{lim} ——正常使用极限状态下结合面的滑移限值 (mm)。

9.2 抗剪承载力验算

9.2.1 由于 UHPC 抗压强度高，较难发生压碎破坏，故单个栓钉连接件的抗剪承载力设计值应根据栓钉剪切破坏确定。

$$V_{\text{sud}} = 0.7 A_s f_{\text{su}} \dots\dots\dots (38)$$

式中：

V_{sud} ——承载能力极限状态下栓钉的抗剪承载力设计值 (N)；

A_s ——栓钉钉杆截面面积 (mm²)；

f_{su} ——栓钉材料的抗拉强度最小值 (MPa)。

9.2.2 抗剪连接件的纵向剪力按下列原则计算：

- 抗剪连接件的作用 (或荷载) 包括形成超高性能混凝土钢桥面铺装体系之后的永久作用和可变作用，应通过计算得到其最大剪力，并与连接件的抗剪能力限值进行比较；
- 钢主梁和 UHPC 层结合面的纵向最大剪力按未开裂分析方法计算，将抗剪连接件的整体计算结果和局部计算结果进行叠加；
- 抗剪连接件的整体计算中单位长度上的纵桥向水平剪力 V_l 按下式 (39) 计算。抗剪连接件的数量宜按栓钉包络图形状进行分段计算，在相应区段内均匀布置；

$$V_1 = \frac{VS}{I_{un}} \dots\dots\dots (39)$$

式中：

V ——形成组合截面之后作用于组合体系的竖向剪力（N）；

S ——UHPC层对组合截面中性轴的面积矩（ mm^3 ）；

I_{un} ——组合截面的惯性矩（ mm^4 ）。

d) UHPC和钢主梁界面的端部应考虑混凝土收缩徐变作用或温度作用对抗剪连接件纵桥向水平剪力的叠加作用，最大单位长度纵向水平剪力 V_{ms} 应按照式（40）进行计算；

$$V_{ms} = \frac{2V_s}{l_{cs}} \dots\dots\dots (40)$$

式中：

V_s ——UHPC收缩徐变或温度效应在钢和UHPC结合面产生的纵桥向水平剪力（N）；

l_{cs} ——UHPC收缩徐变或温度引起的纵桥向集中剪力在结合面的水平传递长度，取主梁相邻腹板间距长度和主梁长度的1/10两者中的较小值（mm）。

e) 在局部计算中抗剪连接件的内力计算宜采用有限元分析法，建立局部计算模型，模拟抗剪连接件的连接作用，并考虑由车轮竖向荷载和车轮刹车水平荷载引起的栓钉纵、横向剪力，车轮刹车水平荷载按车轮竖向荷载的1/2考虑。

9.3 抗剪连接件的疲劳验算

9.3.1 抗剪连接件疲劳验算细则应遵循本规程第 6.5 节的规定。

9.3.2 抗剪连接件的疲劳验算应分别计算总体荷载效应和局部荷载效应，计算整体荷载效应采用第 6.5 节中疲劳荷载 I 和 II，计算局部荷载效应采用第 6.5 节中的疲劳荷载 III，不考虑车轮刹车水平荷载。

9.4 抗剪连接件的数量计算

9.4.1 抗剪连接件的布置数量应满足本规程第 9.2 节、9.3 节要求。

9.4.2 抗剪连接件的数量应保证在车轮荷载作用下，UHPC 层底面的最大拉应力不得超过其轴拉强度。

9.4.3 UHPC 层底面的最大拉应力计算应建立有限元局部模型，作用（或荷载）的效应组合应采用 JTG D60 的基本组合。

10 构造要求

10.1 UHPC 层

10.1.1 UHPC 层厚度不宜小于 45 mm。

10.1.2 UHPC 中钢筋网的设置应符合：

a) UHPC 保护层厚度不应小于 10 mm；

- b) 钢筋直径不宜小于 10 mm，钢筋中心间距可采用 100 mm，受力复杂区可进行加密；
- c) 钢筋接头宜设置在受力小的区段，宜采用焊接或绑扎的方式，并应错开布置。接头布置应符合 JTG 3362 的相关规定；
- d) 加密钢筋避免在加劲肋附近截断；
- e) 钢筋纵横双向布置，横桥向钢筋置于上层；
- f) UHPC 层中钢筋的最小配筋率应符合：
 - 1) 钢筋配筋率应按面积率计算；
 - 2) UHPC 层中钢筋的最小单向配筋率（纵桥向或横桥向）不宜小于 1%。

10.2 钢桥面板及栓钉

10.2.1 桥梁的钢桥面板厚度不宜小于 12 mm，当厚度低于 12 mm 时应进行专题研究。

10.2.2 钢桥面板应作防腐处理。

10.2.3 栓钉的设置应符合：

- a) 栓钉的钉柱直径不宜小于 13 mm，一般情况采用 19 mm；
- b) 栓钉的布置形式可为矩阵式布置；
- c) 栓钉间距应满足抗剪承载力及疲劳要求，并结合加劲肋几何尺寸布置，一般情况下纵横向布设间距为 300 mm；尽量避免栓钉布设在横隔板、腹板及加劲肋的顶面，最小距离不小于 20 mm。

10.3 接缝构造

10.3.1 UHPC 分段浇筑时，接缝宜设置在受压区或拉应力较小的区域，且应满足：

- a) 对于横向接缝，接缝位置宜设置在两相邻横隔板间跨中至前后1/4点的范围内，接缝位置如图 11所示；
- b) 对于纵向接缝，结合车道、腹板（或纵向加劲肋）位置进行布置。

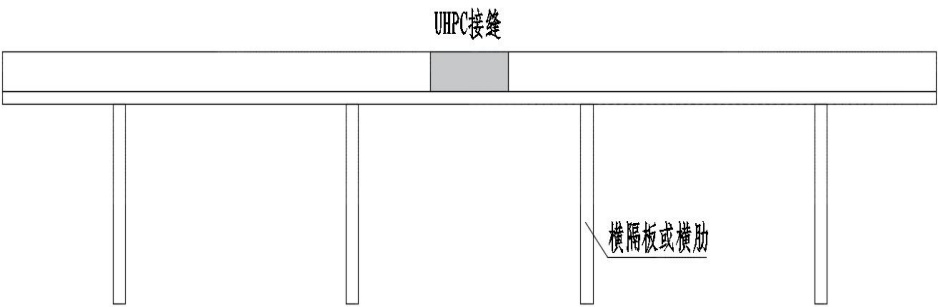


图 11 UHPC 接缝位置

10.3.2 接缝形式可采用方波式，内部钢筋网接头宜错开布置，如图 12 所示。

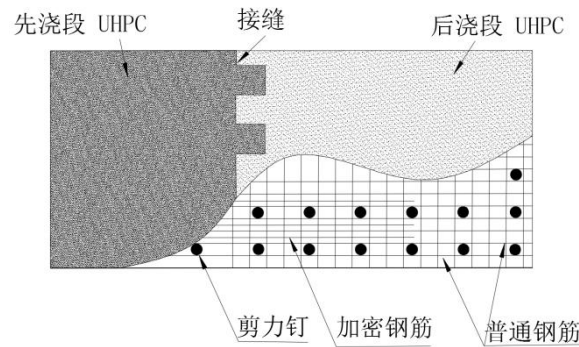


图12 方波式接缝示意图

10.4 其它构造要求

- 10.4.1 面层类型应根据桥梁实际情况设置，且应满足 JTG D50 的要求。
- 10.4.2 UHPC 层与面层之间应设置防水粘结层，并通过结构分析和试验确定防水粘结层方案。
- 10.4.3 UHPC 表面应做糙化处理，可采用抛丸法。

11 施工

11.1 一般规定

- 11.1.1 超高性能混凝土钢桥面铺装体系施工应满足国家及行业标准要求。
- 11.1.2 超高性能混凝土钢桥面铺装体系施工应根据结构特点和受力特性确定施工程序和工艺，保证施工质量。
- 11.1.3 超高性能混凝土钢桥面铺装体系施工主要有以下两种方法：
 - a) 方法一（现浇法）：在钢桥面板上进行 UHPC 层现浇和养护施工，最后铺筑面层；
 - b) 方法二（预制法）：场内制作完成钢主梁节段后，在节段的钢桥面板上浇筑和养护 UHPC 层，梁段运至现场拼装，并完成节段间现浇 UHPC 层的施工，待全桥合拢后，铺筑面层。

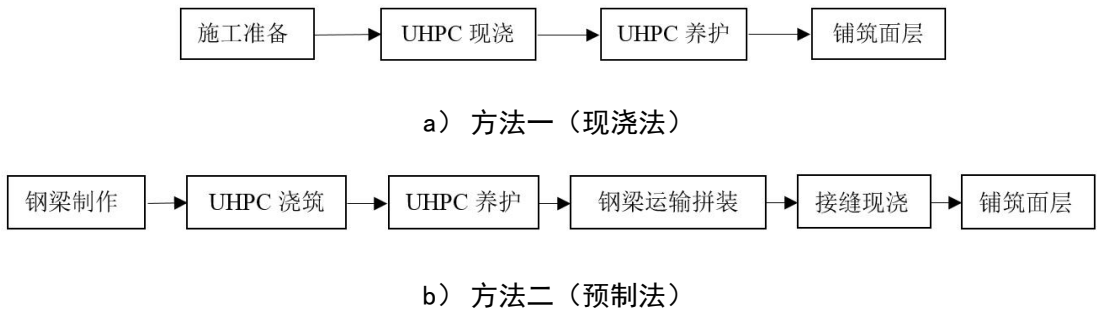


图13 施工流程图

- 11.1.4 施工单位应建立各道工序的质量检查制度，并应留有完整的检查记录。每道工序完工后，应进行全面质量检验，确认合格后才能进入下一道工序的施工。
- 11.2 施工准备
- 11.2.1 施工前根据工程规模、现场条件等进行施工组织设计，编制施工方案。

11.2.2 应按材料使用计划,结合施工进度组织材料进场,并应做好每次进场的试验、检验及复检工作;做好人员上岗培训,熟悉施工工艺;按施工组织计划组织施工设备、试验仪器进场,并做好安装、调试及标定工作。

11.2.3 应根据设计要求、工程经验和原材料性能指标,按拟定 UHPC 初始配合比进行试配、调整及检验,确定施工配合比。

11.3 原材料储存

11.3.1 UHPC 原材料在运输与存放期间应在专用场地存放,应注意防潮、通风。

11.3.2 UHPC 原材料储存、运输过程中应符合:

- a) 储存场地应设在地势较高处,做好防水措施,临时露天堆放时应上盖下垫;
- b) 原材料应按照批号分类堆放标识,不得混堆混用,应先存先用。

11.4 桥面防腐

11.4.1 钢桥面在防腐之前应做表面处理,包含喷砂除锈等。

11.4.2 对于新建钢桥,钢桥面板的喷砂除锈施工应符合:

- a) 钢板表面若有锐边、飞溅、不光滑焊缝及切割边缘等缺陷,应先用工具打磨;
- b) 现场喷砂除锈应采用全自动无尘喷砂设备,严禁二次污染;
- c) 应采用部分带棱角的磨料,比例应按粗糙度要求、钢板表面状况通过试验确定;
- d) 大气相对湿度不宜大于 85%,并应保持通风,严禁雨淋;
- e) 喷砂除锈完成后,应立即检查钢板的清洁度和粗糙度。

11.4.3 应对钢桥面板进行防腐涂装,防腐涂装应按 GB 50917 的有关规定进行,防腐涂装材料质量应符合 JT/T 722 的规定。

11.4.4 对于旧钢桥桥面铺装翻修施工时,清除原桥面铺装层后按照 11.4.2 条进行,清除原桥面铺装层的过程应符合:

- a) 铣刨原铺装层时应严格控制铣刨深度,不得损伤桥面钢板;
- b) 铣刨完毕后,应清洁、干燥;
- c) 清洗完桥面后,对全桥钢桥面板范围内孔洞(如栓接区域个别高强螺栓缺失引起的孔洞)、锈蚀、污染状况进行全面检查。及时将孔洞填补,以防止 UHPC 在摊铺施工过程中流失。

11.5 栓钉焊接

11.5.1 对于新建钢桥,应对钢桥面板每个栓钉位置进行局部打磨,确保焊接处钢桥面板表面平整、光滑。

11.5.2 在焊接栓钉时,应符合:

- a) 应按栓钉的布置位置在钢桥面板上画墨线定位。当栓钉加密时,应先定位出普通位置点,再定位出加密位置点;
- b) 当栓钉的设计位置与钢主梁拼接焊缝位置冲突时,应将栓钉偏离焊缝边界不小于 20 mm,不应将栓钉直接焊接在拼接焊缝的顶面;
- c) 应采用电弧螺柱焊机焊接栓钉。焊接时应控制焊接时间,确保焊接质量;
- d) 焊接完成后,应清除杂物,保持桥面清洁;
- e) 焊接完成后应按 GB 10433 的要求对栓钉进行弯曲试验,防止焊接不牢固。

11.5.3 对于旧钢桥桥面铺装翻修施工，应在焊接栓钉前，清除原桥面铺装层，并应对钢桥面进行清洗与喷砂除锈。

11.6 钢筋铺设

11.6.1 钢筋网搭接方式应符合设计要求，钢筋网安装过程中其它施工应满足 JTG 3362、JTG T F50、JTG/T D64-01 的相关要求。

11.6.2 应在钢桥面上设置垫层钢筋或垫块等，保证钢筋网高度及保护层厚度满足设计要求。钢筋铺设完成后，应对钢筋网高度、间距等进行检查，避免施工中钢筋网的塌陷，同时保持钢筋网的清洁。

11.7 UHPC 搅拌与运输

11.7.1 应保证超高性能混凝土的生产能力、运输能力及施工现场浇筑能力相协调。

11.7.2 UHPC 搅拌应满足以下规定：

- a) 宜采用电子计量系统计量原材料，UHPC 原材料严格按照施工配合比要求进行准确称量；
- b) 宜采用强制式双轴搅拌机搅拌，搅拌时先干拌均匀后再加水湿拌。

11.7.3 UHPC 运输可采用罐车，从罐车卸出拌合料到浇筑完毕宜控制在 2 h 以内；应保证 UHPC 在运输过程中的均匀性、施工和易性，同时尽量减少 UHPC 的转载次数和运输时间。

11.7.4 当对运输设备采取保温隔热措施时，应防止局部 UHPC 温度升高（夏季）或受冻（冬季）。应采取适当防水、保水措施，严禁在运输过程中向 UHPC 内加水。

11.8 UHPC 布料与摊铺

11.8.1 根据 UHPC 供应、摊铺设备、场内外条件等划分布料区域及布料顺序。

11.8.2 宜采用专用摊铺机或振动梁摊铺，同时宜采用平板振动器进行辅助振捣，且应符合下列要求：

- a) 通过试验段确定施工关键参数；
- b) 施工时，UHPC 应能自然流至桥面钢筋网任意处，并经摊铺振捣后能完全覆盖钢筋网和栓钉。接缝处应衔接良好，无台阶或脱空现象；
- c) UHPC 摊铺振捣应能使模板内各部位 UHPC 摊铺平整、振捣密实。对局部厚度不足的部位宜采用人工布料的方式加料振捣抹平；
- d) UHPC 失水过多时，可在摊铺机摊铺前或摊铺后往 UHPC 表面喷洒水雾，以保持 UHPC 处于塑性状态；
- e) UHPC 从布料入模到摊铺振捣完成时间应控制在 30 min 以内。

11.8.3 摊铺振捣抹平完毕后，应在 5 min 内用塑料薄膜将 UHPC 表面覆盖，且应在塑料薄膜表面再次喷洒水雾。

11.9 接缝施工

11.9.1 UHPC 接缝施工应保证铺装体系整体的连接性能和施工质量。

11.9.2 UHPC 接缝凿毛施工应符合以下规定：

- a) 先浇筑段 UHPC 达到一定强度后进行凿毛处理；
- b) 凿毛应从接缝处断面开始，清除松散部位，将钢纤维裸露在外；
- c) 凿毛后，应清除遗留在钢桥面板上的 UHPC 屑末。

11.10 UHPC 养护

11.10.1 UHPC 养护应视现场温度条件分为一般保湿养护和高温蒸汽养护。

11.10.2 当日平均温度在 10℃以上，日最低温度在 5℃以上，进行一般保湿养护，养护时间为 7 d，定时洒水保湿。

11.10.3 当日平均温度在 10℃以下，日最低温度在 5℃以下，进行高温蒸汽养护：

- a) 养护前，应根据现场条件和养护要求确定养护方案；
- b) 养护温度恒定在 80℃时，养护时间不少于 72 h；养护温度恒定在 90℃时，养护时间不少于 48 h，养护过程中蒸汽养护棚内的相对湿度不低于 95%，其它可按照 GB/T31387 相关要求要求进行。

11.10.4 高温蒸汽养护结束后，应撤除养护设备并清扫干净。对明显凹凸不平部位，应采用打磨机打磨，确保表面平整。

11.11 面层摊铺

面层摊铺施工应符合 JTG F40 的相关规定。

11.12 特殊气候条件施工

11.12.1 超高性能混凝土钢桥面铺装体系的 UHPC 层浇筑时，应有专人负责接收和报告气象预报，遇有降雨、大风（6 级及以上）和寒流侵袭（气温低于 5℃）时，不准许进行浇筑施工。

11.12.2 超高性能混凝土钢桥面铺装体系在特殊气候条件下的施工应符合下述规定：

- a) 施工时应随时检测气温和混合料、拌和水及路面的温度；
- b) 低温施工：当施工气温处于 5℃～10℃时，超高性能混凝土钢桥面铺装体系施工应采取适当的保温覆盖措施；
- c) 高温施工：当施工昼夜日平均气温高于 30℃时，注意对 UHPC 层洒水保湿养生。混凝土拌和物的温度不得超过 35℃。

12 检验与验收

12.1 一般规定

12.1.1 根据全面质量管理要求，建立健全有效的质量保证体系，对施工各工序的质量进行检查、控制，并应达到所规定的质量要求，确保施工质量。

12.1.2 超高性能混凝土钢桥面铺装工程应按分项工程进行质量检验与验收，并应符合 JTG F80/1 的有关规定。

12.1.3 面层施工检验按照相关规范规定执行。

12.1.4 超高性能混凝土钢桥面铺装施工原始记录等相关资料均应如实保存完好。

12.2 原材料检验

12.2.1 原材料应具有供应商提供的出厂合格检验证书，并按有关的检验项目、批次规定，严格实施进场检验。

12.2.2 面层原材料应符合相关规范技术要求。

12.2.3 UHPC 原材料的检验批量应符合下列规定：

- a) 钢筋、钢纤维、栓钉按进场的批次和产品的抽样检验方案确定；
- b) 同一工程、同一原材料来源、同一组生产设备生产的成型钢筋，检验批量不应大于 60 t；
- c) 同一工程、同一原材料来源、同一组生产设备生产的钢纤维，检验批量不应大于 30 t；
- d) 同一工程、同一原材料来源、同一组生产设备生产的栓钉，按照国家标准频率进行检验；

12.2.4 原材料进场检验的样品应随机抽取。

12.3 桥面板表面处理施工检验

12.3.1 新建钢桥桥面铺装或旧钢桥桥面铺装翻修施工时,桥面清理除锈应满足表 13 中相关检验要求。

表13 桥面清理除锈实测项目

项次	检查项目	要求	检测方法和频率
1	相对湿度	$\leq 85\%$	湿度计测量,每班测 1 次
2	氯化物含量	$\leq 0.014\%$	试纸测试, ISO 8502-9, 每 200m ² 检测 1 处
3	锈蚀情况	无蓝点	氰化钾试纸测试, ISO 8502-1, 每 100m ² 检测 1 处
4	桥面清洁度	$\geq \text{Sa}2.5$ 级	目视比较法, GB/T 8923.1, 每 200m ² 检测 1 处
5	桥面粗糙度	满足设计要求	比较样块法, GB/T 13288.2, 每 200m ² 检测 1 处

12.3.2 新建钢桥桥面铺装或旧钢桥桥面铺装翻修施工时,桥面清理除锈的外观鉴定要求:

- a) 桥面板表面应光亮、清洁和干燥,不符合要求时必须进行处理;
- b) 桥面板应无损伤和坑洞,但近距离应能观察到经喷砂除锈后形成的局部压痕。

12.4 栓钉焊接检验

12.4.1 无论是新建钢桥桥面铺装还是旧钢桥桥面铺装翻修施工,焊接栓钉应满足表 14 中相关检验要求。

表14 栓钉焊接实测项目

项次	检查项目	允许偏差	检测方法和频率	要求
1	栓钉高度	$\leq 3\text{mm}$	钢尺测量,每50m ² 检测1处	按设计图纸
2	栓钉倾角	$\leq 10^\circ$	钢尺及量角器测量,每50m ² 检测1处	90°
3	栓钉间距	$\leq 10\text{mm}$	钢尺测量,每50m ² 检测1处	按设计图纸
4	焊缝可靠性	$\leq 5\%$	重锤平击钉帽,每50m ² 检测1处	97.5%

12.4.2 栓钉焊接的外观鉴定要求:

- a) 栓钉应位置准确、整齐,无明显错位;
- b) 栓钉保持竖直,无明显倾角;
- c) 焊缝外形应饱满,无气孔、夹渣、裂纹等明显缺陷。

12.5 钢筋网铺设检验

12.5.1 钢筋网铺设应符合表 15 中相关检验要求。

表15 钢筋网铺设实测项目

项次	检查项目	允许偏差 (mm)	检测方法和频率
1	钢筋搭接长度	≤ 10	钢尺测量,每 100m ² 检测 1 处

表15 钢筋网铺设实测项目（续）

项次	检查项目	允许偏差（mm）	检测方法和频率
2	钢筋网高度	≤3	钢尺测量，每 100m ² 检测 1 处
3	钢筋网间距	≤10	钢尺或游标卡尺测量，每 100m ² 检测 1 处

12.5.2 钢筋网铺设的外观鉴定要求：

- a) 垫层钢筋或垫块等应布置合理，密度均匀；
- b) 钢筋网纵、横桥向间距均匀，上层钢筋顶面与栓钉钉帽顶面的高度差基本均匀；
- c) 接缝布置合理，位置错开，接缝长度满足要求，接缝焊接或绑扎应牢固；
- d) 钢筋网间应洁净、无积水和杂物。

12.6 UHPC 摊铺施工检验

12.6.1 UHPC 摊铺施工完成后应对 UHPC 性能、摊铺施工及养护等相关实测项目进行检验，检验项目应满足表 16、表 17、表 18 中相关检验要求。

表16 UHPC性能实测项目

项次	检查项目	检测方法和频率	性能要求
1	抗压强度	100mm×100mm×100mm 立方体试件抗压试验，每 40m ³ 检测 1 组	$f_{cu,m} - 1.1S_{f_{cu}} \geq f_{cu,k}$ $f_{cu,min} \geq 0.95f_{cu,k}$
2	抗弯拉强度	100mm×100mm×400mm 棱柱体试件抗弯拉试验，每 40m ³ 检测 1 组	$f_{f,m} \geq 1.05f_{fk}$ $f_{f,min} \geq 0.95f_{fk}$
3	弹性模量	GB/T50081，100mm×100mm×300mm 棱柱体试件轴压试验，每 40m ³ 检测 1 组	按设计要求
4	坍落度	GB/T50080，每 40m ³ 检测 1 次	≥180mm ≤280mm

注： $f_{cu,m}$ 和 $f_{cu,min}$ 分别为UHPC立方体抗压强度的平均值和最小值， $f_{f,m}$ 和 $f_{f,min}$ 分别为UHPC的抗弯拉强度的平均值和最小值。

表17 UHPC层摊铺施工实测项目

项次	检查项目	允许偏差	检测方法和频率
1	混凝土总层厚	≤3mm	摊铺过程中，将直钢丝插入到 UHPC 的底部，以直尺测量钢丝的浸润深度， 每 40m ² 检测 1 处
2	桥面纵、横坡	≤0.2%	水准仪、皮尺测量，每 40m ² 检测 1 处
3	平整度	≤3mm	3m 铝合金直尺，每 40m ² 检测 1 处

表18 UHPC层高温蒸汽养护实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检测方法和频率
1	养护棚内温度	$\pm 5^{\circ}\text{C}$	温度传感器，每小时检查 2 次
2	养护棚内湿度	$\pm 5\%$	湿度传感器，每小时检查 2 次
3	养护时间	$\pm 1\text{h}$	计时器，每小时检查 2 次

12.6.2 UHPC 摊铺施工的外观鉴定要求：

- 摊铺过程中，UHPC应色泽正常，无发干或发亮现象；
- UHPC应流动性好，倾倒至桥面板时，应能自然流动至钢筋网间。经摊铺振捣后，应能完全覆盖钢筋网和栓钉，且表面厚度应均匀一致，无坑洼；
- 振捣充分和保湿养护后，UHPC层应均匀完好，且不应有龟裂现象；
- 采用高温蒸汽养护时，养护完成后，UHPC层应均匀完好，且应无收缩裂纹；
- UHPC层的边角处、不同浇筑时期接缝处等位置应衔接良好，无脱空、台阶现象；
- 接缝区域先浇段UHPC侧面凿毛处理后，表面粗糙，断面上钢纤维裸露在外。

12.7 面层施工检验

12.7.1 面层的外观鉴定要求：

- 面层厚度应均匀，压实紧密，无松散料，且不应出现泛油、裂缝、粗细料集中等现象，表面应无明显碾压轮迹；
- 边角位置的铺装层铺装应良好，且无脱空现象；
- 搭接处应紧密、平顺，不得有积水现象；
- 桥面应整体整洁干净，且应达到通车要求。

12.7.2 面层其余指标应满足 JTG D50、JTG F40 相关要求。

12.8 施工验收

12.8.1 质量验收评定工作应在符合下列规定的前提下进行：

- 使用的原材料、半成品、成品及施工工艺应符合基本要求的规定，检验结果应经监理工程师检查认可；
- 无严重外观缺陷，且质量保证资料应真实齐全。

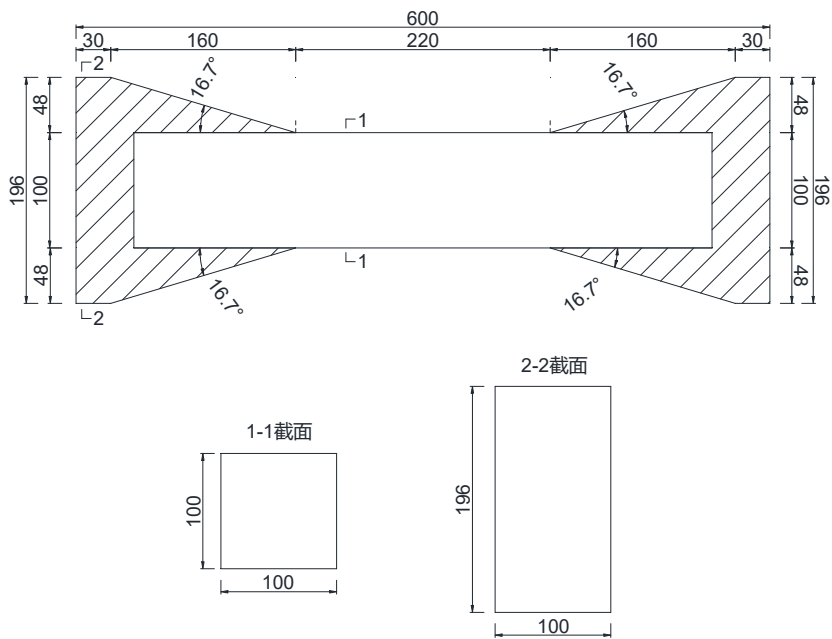
12.8.2 质量保证资料应包括下列内容：

- 所用原材料、半成品和成品的质量检验结果；
- 施工配合比、重要工序交接检查、栓钉施工检查、钢筋网施工检查、UHPC 施工检查记录；
- 各项质量控制指标的试验数据和质量检验资料；
- 施工过程中遇到的非正常情况记录及其对工程质量影响分析；
- 施工过程中如发生质量事故，经处理补救后，达到设计要求的认可证明文件。

12.8.3 对工程质量验收不合格的，监理单位应责令施工单位进行缺陷修补或返工，并应重新进行质量验收。

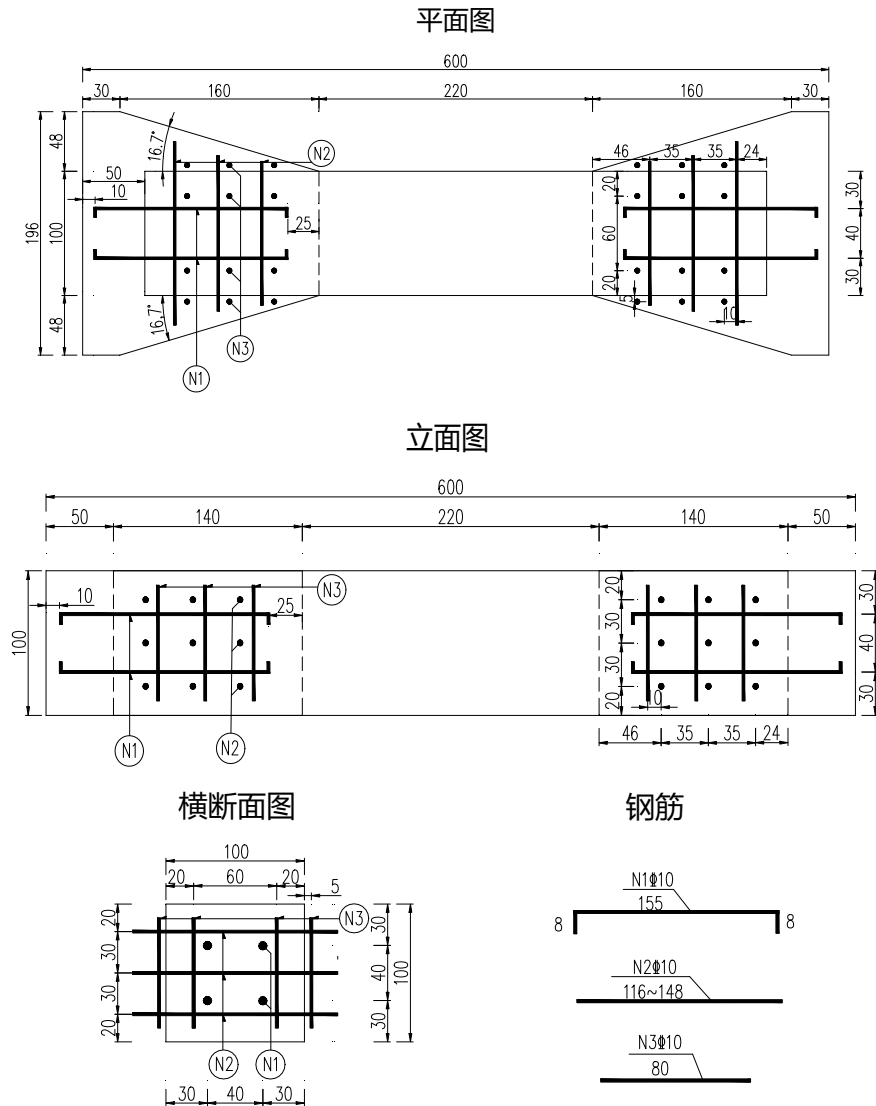
附录 A
(资料性)
UHPC 轴心抗拉强度试验方法

- A. 1 为进一步规范UHPC抗拉强度的试验方法，并在检验或控制UHPC预制或现浇构件的质量时，有一个统一的UHPC抗拉强度的指标，特制定此推荐试验方法。
- A. 2 UHPC的取样应符合GB/T 50080 中的有关规定。
- A. 3 UHPC轴心抗拉强度试验应以三个试件为一组，每组试件所用的拌合物应从同一盘混凝土或同一车混凝土中取样。
- A. 4 UHPC轴拉试件尺寸如图A. 1 所示。试件总长度为 600 mm，第一次浇筑尺寸为 500 mm×100 mm×100 mm的长方体，待达到一定强度后凿毛并进行两端楔形块的二次浇筑（图A. 1 中阴影部分）。最终成型后试件等截面段长度为 220 mm，两端楔形块长度均为 190 mm，等截面段横截面尺寸为 100 mm×100 mm，两端楔形块横断面由 100 mm×100 mm线性变化为 100 mm×196 mm，并在最端头 30 mm长度范围内为 100 mm×196 mm的等截面，楔形块斜截面与长方体相应侧面角度为 16.7°。



图A. 1 UHPC轴拉试件设计尺寸图（mm）

- A. 5 UHPC轴拉试件钢筋的布置如图A. 2 所示。



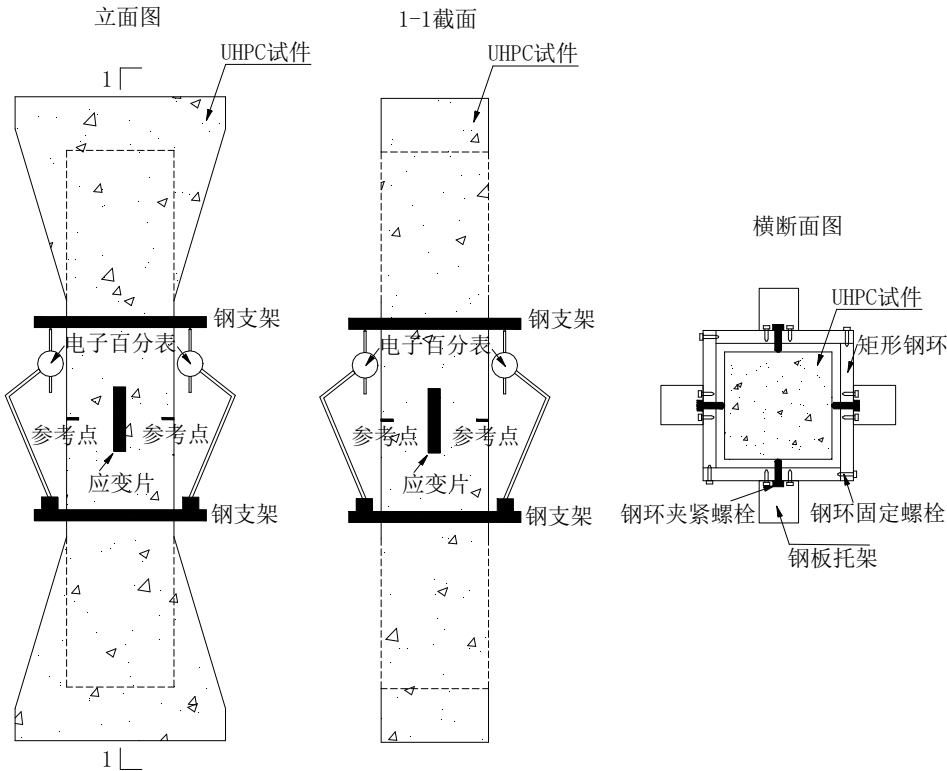
图A.2 UHPC轴拉试件普通钢筋布置图 (mm)

- A. 6 应对试件尺寸、模板制作与安装等全过程进行精细化控制，降低因试件自身带来的不利影响。UHPC轴拉试件制备步骤如下：
- a) 长方体等截面段第一次UHPC浇筑。试模内表面应涂上不与混凝土发生反应的脱模剂，试验成型后应立即用不透水薄膜覆盖表面。在模板两端植筋处开孔，孔径应略大于钢筋直径，便于UHPC能够自由变形而不受钢筋约束，同时应保证开孔处不会出现漏浆，浇筑时应振捣密实；
 - b) 两端楔形块第二次UHPC浇筑。试件养护至一定强度后，对两端二次浇筑处进行人工凿毛，并在两侧结合面处布置横向钢筋，在顶面钢筋端部焊接钢筋头，保证结合面抗剪、抗拔性能以防止两次浇筑界面处发生劈裂。浇筑楔形块时合理设计模板结构并采取科学的监测手段，保证楔形块两侧与第一次浇筑界面的夹角均为 16.7° 。采取有效措施控制UHPC试件各个相对面的对称性与平行度、表面平滑度。
- A. 7 为保证试件与试验机连接性能良好，连接装置上端设置双向转动功能，避免试件加载过程中偏心引起的附加弯矩。
- A. 8 在试件各面标记参考点，选择四面中心位置粘贴应变片；设计钢支架并参照参考点进行安装，钢支架可用于安装磁性表座及电子百分表，电子百分表安装于四个侧面中心。试验前对原始标距进行记录，

试验过程中密切观察钢支架与试件参考点位移值以判断支架与试件是否存在滑移现象。试验过程中分多级缓慢加载，关注 4 个应变片及 4 个电子百分表之间位移值是否存在较大差距，若存在较大偏位则应及时纠偏后方可继续试验操作。正式试验前应进行预拉检查应变片及电子百分表质量。试验前预拉以检查试件的偏心程度。预拉荷载为 10 kN，以应变测试结果为准，判断偏心程度，调整工装使偏心率小于 15 %。偏心率计算公式 (A. 1)。

$$k = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \times 100\% \dots\dots\dots (A. 1)$$

式中：
 ε_1 、 ε_2 ——相对侧应变值；
 k ——轴拉试件偏心率。
A. 9 位移及应变测点布置如图A. 3 所示。正式试验前对试件预拉至 10 kN以消除试验系统的非弹性变形，正式试验过程采用分级加载，每级荷载为 2 kN，加载速度为 4 kN/min，根据加载过程中实际情况进行必要的级数加密或改为位移控制，直至试件拉断。



图A. 3 UHPC轴拉试验加载方案

A. 10 UHPC轴心抗拉强度按下式计算：

$$f_t = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (A. 2)$$

式中：
 f_t ——UHPC试件轴心抗拉度 (MPa) ；
 F ——试件破坏荷载 (N) ；

A ——试件中部横截面积 (mm^2)。

A.11 UHPC轴心抗拉强度值的确定应符合下列规定：

- a) 三个试件测值的算数平均值作为该组试件的强度值（精确至0.1 MPa）；
- b) 三个测值中最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的15 %时，则把最大及最小值一并舍除，取中间值作为该组试件的轴心抗拉强度值；
- c) 如最大值和最小值与中间值的差均超过中间值的15 %，则该组试件的试验结果无效。

附 录 B

(资料性)

开口加劲肋侧扭屈曲的弹性临界弯矩计算

B.1 开口加劲肋侧扭屈曲的弹性临界弯矩宜采用数值分析方法计算。

B.2 开口加劲肋侧扭屈曲的弹性临界弯矩可采用弹性约束压杆模型,见图B.1,按下列公式(B.1)、(B.2)、(B.3)、(B.4)、(B.5)、(B.6)、(B.7)简化计算:

$$M_{cr} = \frac{N_{cr} W_{0s}}{A_{sb} + A_{sw} / 2} \dots\dots\dots (B.1)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E_s I_{sby}}{l_0^2} \dots\dots\dots (B.2)$$

$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{m^2 + \frac{k_s l^4}{m^2 \pi^4 E_s I_{sby}}}} \dots\dots\dots (B.3)$$

$$m^2(m+1)^2 = \frac{k_s l^4}{\pi^4 E_s I_{sby}} \dots\dots\dots (B.4)$$

$$k_s = \frac{3E_s I_w}{h_s} \dots\dots\dots (B.5)$$

$$I_w = \frac{1 \times t_w^3}{12} \dots\dots\dots (B.6)$$

$$I_{sby} = \frac{t_{sb} b_{sb}^3}{12} \dots\dots\dots (B.7)$$

式中:

M_{cr} ——开口加劲肋侧扭屈曲的弹性临界弯矩 (N·mm);

N_{cr} ——等效弹性约束压杆的临界力 (N);

W_{0s} ——不考虑开裂UHPC的截面模量 (mm³);

A_{sb} 、 A_{sw} ——受压下翼缘和腹板的面积 (mm²);

E_s ——钢材弹性模量 (MPa);

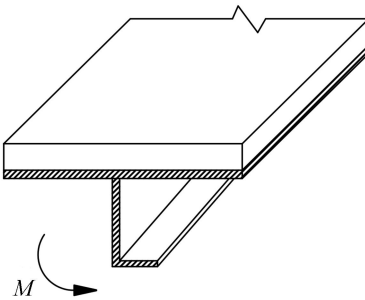
I_{sby} ——等效弹性约束压杆关于y轴的惯性矩 (mm⁴);

l_0 ——弹性约束压杆的计算长度 (mm);

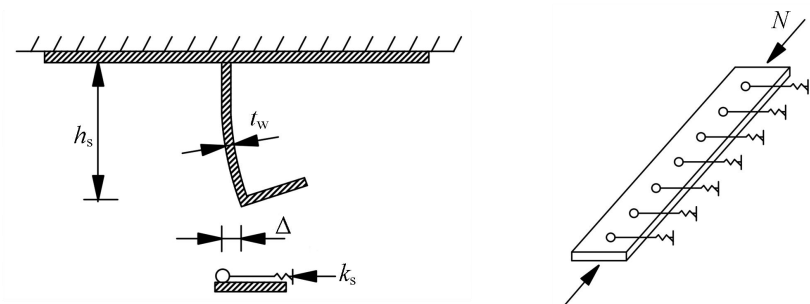
l ——弹性约束压杆的长度 (mm);

m ——计算过程中无量纲数;

- k_s ——单位梁长的转动约束刚度 (N)；
 I_w ——单位宽度腹板出平面的截面惯性矩 (mm^3)；
 h_s ——钢主梁翼缘剪力中心间的距离 (mm)；
 t_w ——钢主梁腹板厚度 (mm)；
 b_{sb} 、 t_{sb} ——钢主梁下翼缘的宽度和厚度 (mm)。



a) 受负弯矩作用的超高性能混凝土钢桥面铺装体系的桥面结构层



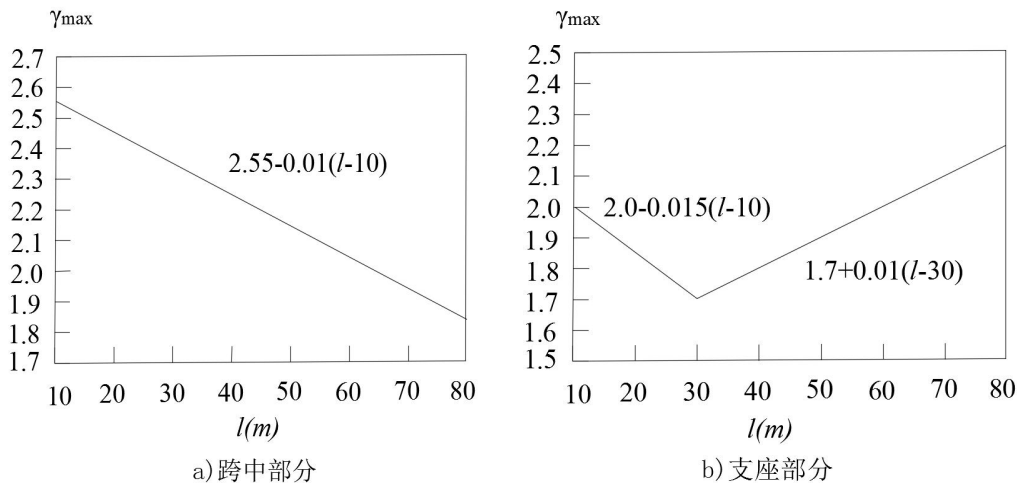
b) 弹性侧向约束

c) 计算模式

图B.1 弹性约束压杆模型

附录 C
(资料性)
损伤等效系数的计算方法

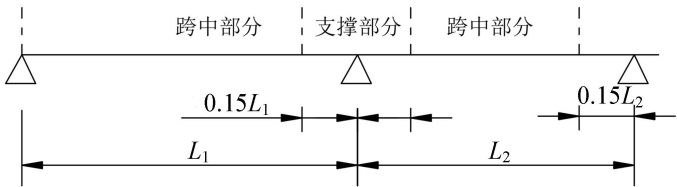
C.1 损伤效应系数 γ_1 根据验算构件影响线（面）的临界长度 l 按图C.1 取值。当 l 大于 80 m 时，按 80 m 计，当 l 小于 10 m 时，按 10 m 计。



图C.1 针对弯矩的 λ_1 取值图

验算截面对应的临界长度 l 按以下规则确定：

- a) 用于弯矩计算：
- 1) 对于简支梁，取其跨径值；
 - 2) 对于连续梁跨中部位截面（如图C.2），取验算截面所在跨的跨径；
 - 3) 对于连续梁支承部分截面（如图C.2），取相邻两跨跨径的平均值；
 - 4) 对于桥道横梁，取相邻桥道纵梁跨径之和。
- b) 用于剪力计算：
- 1) 对于支承部分截面（如图C.2），取验算截面所在跨的跨径值；
 - 2) 对于跨中部分截面（如图C.2），取验算截面所在跨跨径的0.4倍。



图C.2 跨中部分与支撑部分的范围划分

C.2 损伤效应系数 γ_2 为交通流量系数，由下式（C.1）计算确定：

$$\gamma_2 = \frac{Q_0}{480} \left(\frac{N_{ly}}{0.5 \times 10^6} \right)^{1/5} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

Q_0 ——疲劳荷载模型车总重，对于模型Ⅱ为445 kN，对于模型Ⅲ为480 kN；

N_{ly} ——慢车道或主车道的重车（总质量大于100 KN）年交通量（预测年），应通过对近似交通状态道路进行交通调查得到，当无可靠数据时按下式（C.2）计算：

$$N_{ly} = \frac{0.9pN_y}{j} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

N_y ——计算车道所在行车方向上的年总交通量；

p ——重车载总交通量中所占的比例，当无可靠数据时按照表C.1取值；

j ——在该行车方向上慢车道与主车道数量和。

表C.1 重车数量占总交通量的比例

交通等级		重车数量占总交通量的比例
1	港口、矿区等以货运为主功能的高速公路或一级公路	80%
2	其它高速公路或一级公路	40%
3	二级公路	20%
4	三、四级公路	10%

C.3 损伤效应系数 λ_3 为设计寿命系数，由下式（C.3）计算确定。

$$\lambda_3 = (t_{Ld} / 100)^{1/5} \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

t_{Ld} ——构件的设计使用寿命。

C.4 损伤效应系数 λ_4 为多车道效应系数，由下式（C.4）计算确定：

$$\lambda_4 = \left[1 + \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right)^5 + \dots + \frac{N_j}{N_1} \left(\frac{\eta_j}{\eta_1} \right)^5 + \dots + \frac{N_k}{N_1} \left(\frac{\eta_k}{\eta_1} \right)^5 \right]^{1/5} \dots\dots\dots (C.4)$$

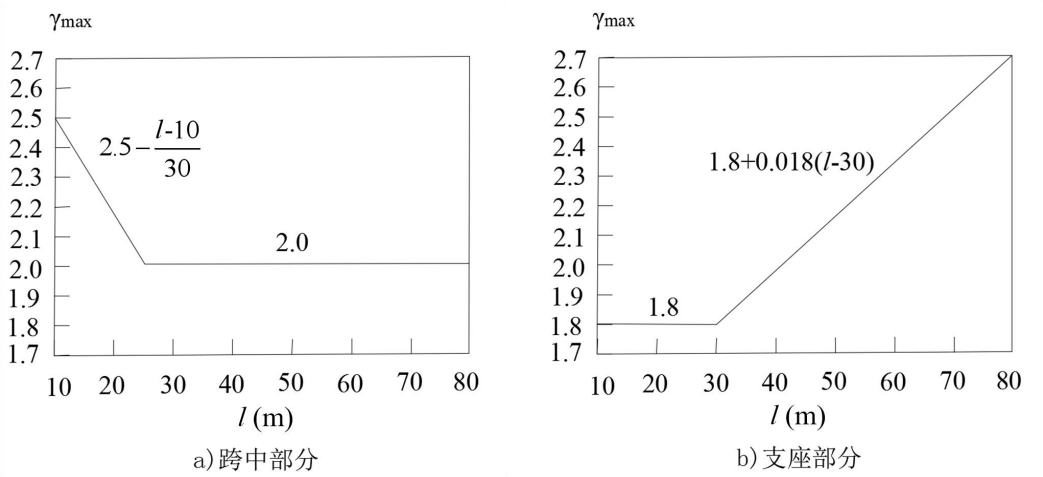
式中：

k ——慢车道和主车道数量和；

N_i ——每年在 j 车道行驶的重车车辆数；

η_i ——对应于车道 j 中线处，形成应力幅的内力影响线值，取正值。

C.5 $\lambda_{\max}$ 根据图C.3 取值。

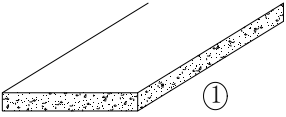
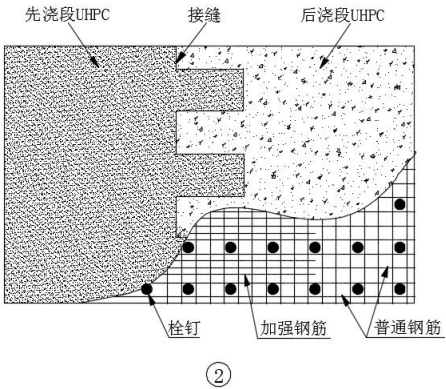


图C.3 针对弯矩的 $\lambda_{\max}$ 取值

附 录 D
(资料性)
疲劳细节和疲劳寿命

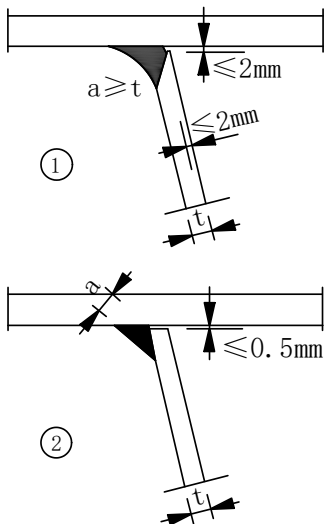
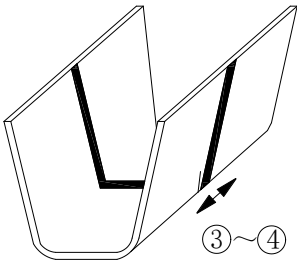
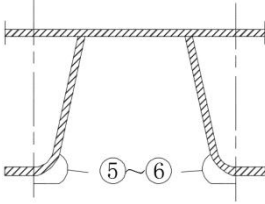
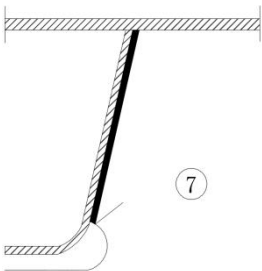
D.1 UHPC层的主要疲劳细节如表D.1 所示，各细节分类均取 200 万次寿命时的疲劳强度。 f_t^r 、 $f_{t,joint}^r$ 参见附录E。

表D.1 UHPC层的疲劳细节及分类

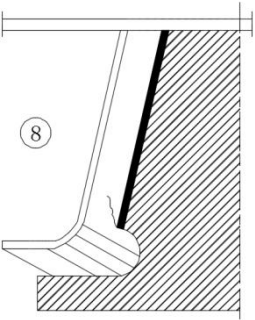
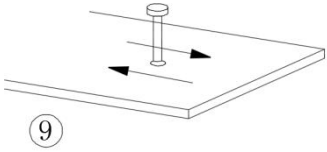
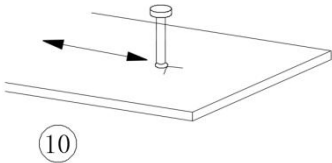
200 万次疲劳强度 (MPa)	细节位置及示意图	细节描述和施工要求
$0.5f_t^r$	UHPC 层连续区域 	1) UHPC 层连续浇筑
$0.5f_{t,joint}^r$	UHPC 接缝区域 	2) 先浇-后浇交界区域设置 UHPC 接缝

D.2 钢梁的疲劳细节如表D.2 所示，各细节分类均取 200 万次时的疲劳寿命。

表D.2 钢梁主要疲劳细节分类

200 万次疲劳强度 (MPa)	细节位置及示意图	细节描述及施工要求
100	面板-纵肋焊缝	1) 满足 $a \geq t$ 的部分熔透坡口焊。
90		2) 贴角焊或不满足 1) 的部分熔透坡口焊。
112	纵肋对接焊缝	3) 全熔透坡口焊，所有焊缝沿箭头方向打磨至同纵肋表面平齐；使用起焊板和熄焊板，并在焊后去除；焊后进行无损检测。
90		4) 全熔透坡口焊，焊缝凸面高度不超过焊缝宽度的 10%，并均匀过渡至纵肋表面；使用起焊板和熄焊板，并在焊后去除；焊后进行无损检测。
140*	横隔板弧形切口	5) 横隔板过焊孔处弧形切口的自由边，切割或机械气割后修整的材料。
125*		6) 边缘带浅且规则线痕的机械气割材料或修整过边缘不连续的手工气割材料。疲劳验算均宜采用名义应力法，通过有限元计算获得。
90	纵肋-横隔板焊缝（横隔板弧形切口 起点位置） 	7) 位于纵肋-横隔板焊缝处，横隔板弧形切口的起点位置。

表D.2 钢梁主要疲劳细节分类（续）

200 万次疲劳强度 (MPa)	细节位置及示意图	细节描述及施工要求
90	纵肋-横隔板焊缝（纵肋腹板中的焊缝端部位置） 	8) 位于纵肋-横隔板焊缝处，纵肋腹板中的焊缝端部位置。
90* (m=8)	栓钉 	9) 计算栓钉的剪应力幅；疲劳验算宜采用名义应力法。
90	栓钉根部的钢桥面板 	10) 位于焊接栓钉底部的钢桥面板。

注 1：表中各细节按200万次寿命时的疲劳强度（MPa）进行分类，其中带*的为名义应力疲劳强度，不带*的为热点应力疲劳强度；

注 2：因热点应力法不适用于疲劳细节5、6、9，建议采用名义应力法计算；

注 3：对于非焊接疲劳细节（如横隔板弧形切口自由边），或当焊接疲劳细节进行了消除残余应力处理时，若疲劳细节的部分或全部应力循环为压应力时，应考虑平均应力对疲劳强度的影响。该影响通过降低设计应力幅实现，即设计应力幅的计算考虑全部的拉应力和60%的压应力，如公式D.1所示。

$$\Delta\sigma_p = \sigma_{pmax} + 0.6|\sigma_{pmin}| \cdots \cdots (D.1)$$

附 录 E
(资料性)
UHPC 名义弯拉应力容许值

E.1 配筋UHPC名义弯拉应力容许值

密配筋对于提高UHPC的开裂前抗拉强度具有显著效果。当桥面的面板厚12 mm, UHPC层厚度为50 mm, 纵横桥向配筋, 直径为10 mm时, 各强度等级下, 配筋UHPC的名义弯拉应力容许值可按表E. 1取值。

表E. 1 各强度等级下配筋UHPC的名义弯拉应力容许值

强度等级	钢筋间距 (mm)	名义弯拉应力容许值 f_t^r (MPa)
UHPC100	100	13.2
	75	15.3
	50	18.4
UHPC120	100	15.2
	75	17.4
	50	20.3
UHPC140	100	17.2
	75	19.3
	50	22.4

E.2 UHPC接缝的名义弯拉应力容许值

当施工过程中需要对UHPC进行分跨、分幅或分段浇筑时, 应在先浇-后浇连接位置设置接缝。接缝处UHPC的名义弯拉应力容许值可按应表E. 1中配筋UHPC名义弯拉应力容许值的0. 65倍取值, 如表E. 2所示。

表E. 2 各强度等级下UHPC接缝的名义弯拉应力容许值

强度等级	钢筋间距 (mm)	名义弯拉应力容许值 $f_{t,joint}^r$ (MPa)
UHPC100	100	8.6
	75	9.9
	50	12.0

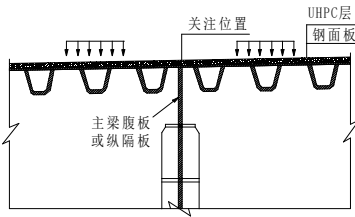
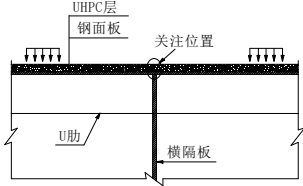
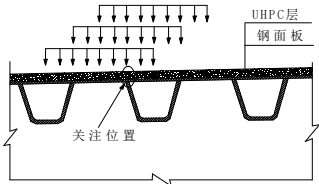
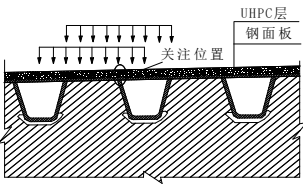
表E.2 各强度等级下UHPC接缝的名义弯拉应力容许值（续）

强度等级	钢筋间距（mm）	名义弯拉应力容许值 $f_{t,joint}^r$ （MPa）
UHPC120	100	9.9
	75	11.3
	50	13.2
UHPC140	100	11.2
	75	12.5
	50	14.6

附 录 F
(资料性)
UHPC 层第二、三体系主要关注位置

UHPC层第二、三体系应力计算时主要关注的位置如表F. 1所示。

表F. 1 UHPC层第二、三体系应力计算主要关注位置

序号	关注位置	图示	说明
1	主梁腹板或纵隔板顶面位置		正应力，沿横桥向
2	横隔板顶面位置		正应力，沿纵桥向
3	纵肋腹板顶面位置-相邻横隔板间的跨中处		正应力，沿横桥向
4	纵肋腹板顶面位置-横隔板断面处		正应力，沿横桥向

附录 G
(资料性)

降低 UHPC 层名义拉应力的方法

G.1 如UHPC层抗裂验算不满足本规程第 7.2.1 条，除采用提高UHPC等级、减小钢筋间距的方法外，还可以采用合理的措施降低UHPC层名义应力，使其满足抗裂要求。主要方法有：分阶段浇筑混凝土、预加荷载法、支点位移法等，也可以综合使用。

G.2 对于采用超高性能混凝土钢桥面铺装体系的连续梁桥，正确安排UHPC层施工顺序，可以有效降低负弯矩区UHPC层的应力。分阶段浇筑如图G.1 所示。

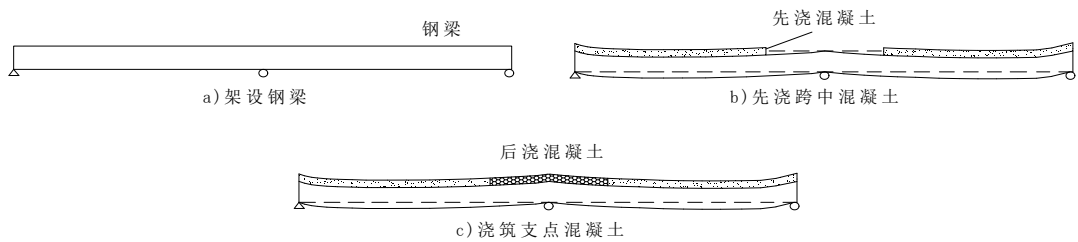
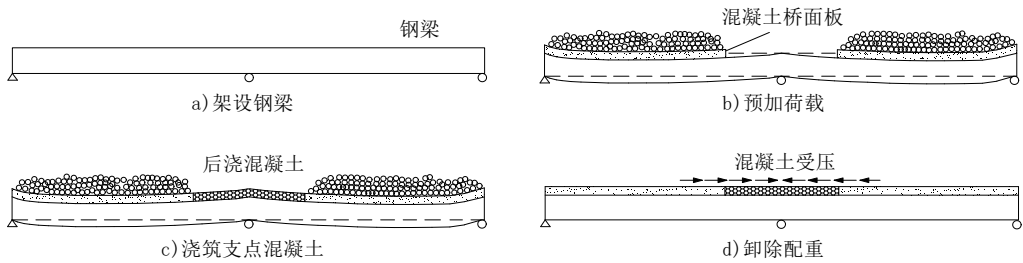
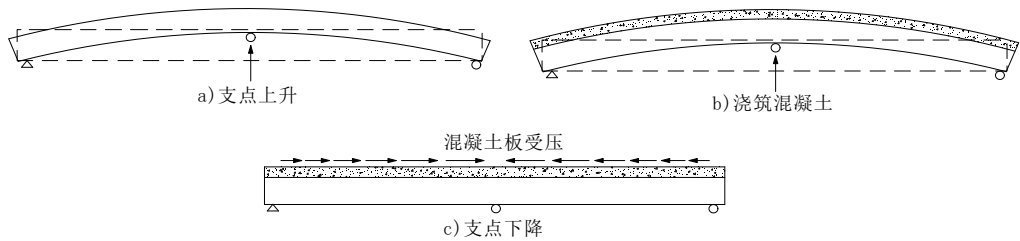


图 G.1 分阶段浇筑法

G.3 对采用超高性能混凝土钢桥铺装体系的连续梁桥，可采用预加荷载法或支点位移法，依靠钢梁的强迫变形对组合梁施加预应力，降低UHPC层的应力。如图G.2 和图G.3 所示。



图G.2 预加荷载法



图G.3 支点位移

《超高性能混凝土钢桥面铺装体系技术规程》条文说明

本条文说明系对重点条文的编制依据、存在的问题以及在执行过程中应注意的事项等予以说明，不具备与规范同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。为了减小篇幅，只列条文号，未抄录原条文。

- 4.1.1 胶砂强度较高并且掺加混合料较少的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，适合用于配制 UHPC，便于掺用较多的矿物掺合料来改善混凝土的性能。
- 4.1.5 现行国家标准 GB 8076《混凝土外加剂》是我国关于外加剂产品的主要标准。现行国家标准 GB 50119《混凝土外加剂应用技术规范》规定了不同品种外加剂的应用技术要求。UHPC 的水泥用量大、水胶比低，为保证 UHPC 的性能，宜用高性能减水剂，且减水率大于 30%。
- 4.1.7 混凝土用水包括拌合用水和养护用水。现行行业标准 JGJ 63《混凝土用水标准》包括了各种混凝土用水的规定。
- 4.1.9 本条中， $f_{td} = f_{tk} / 1.45$ ， $f_{cd} = f_{ck} / 1.45$ ，其中 1.45 为 UHPC 的材料性能分项系数； $f_{ck} = f_{cu,k} / 1.62$ ，其中 1.62 为 UHPC 立方体抗压强度标准值与轴心抗压强度标准值的比值。轴心抗拉强度根据附录 A 试验方法获得。其中采用的 UHPC 容重与施工配合比有关，其重量略重于普通混凝土。当钢纤维含量为 0~2% 时，UHPC 密度可取 2500~2800kg/m³。
- 4.1.10 UHPC 抗剪强度的计算公式参考了文献《混凝土的抗剪强度、剪切模量和弹性模量》（施士昇；1999）。
- 4.1.11 UHPC 弹性模量的取值参考了文献《Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections》（FHWA；2013）的计算公式， $E_c = 3435.6\sqrt{f_{cu,k}}$ 。
- 4.1.12 本条文 UHPC 剪切模量的取值参考了 JTG D62《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》。
- 4.1.15 钢筋在 UHPC 内锚固长度的取值参考了文献《Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections》（FHWA；2013）。
- 4.1.16 本条文 UHPC 的抗渗级别定义参考了 GB 50164《混凝土质量控制标准》相关规定，测试方法应采用逐级加压法。考虑到 UHPC 良好的致密性，本条规定其渗透压强为 2.0MPa，这意味着 UHPC 在 2.0MPa 的静水压力作用下不会渗水。
- 5.3 承载能力极限状态计算包括了持久状况和偶然状况下构件截面的承载能力计算，以及稳定、抗剪连接件、倾覆、疲劳等方面的计算。在作用或荷载的组合中，截面抗弯、抗剪承载能力、抗剪连接件以及整体稳定计算时效应组合采用基本组合；倾覆计算和疲劳计算时效应组合采用标准组合。
- 5.5 在 JTG D60《公路桥涵通用设计规范》中，由于普通混凝土板较厚，组合桥梁的温度按照多折线考虑，其中折线的第一段（从混凝土顶面开始）的范围为 100mm。考虑到 UHPC 层较薄，其厚度一般小于 100mm，UHPC 层始终落在第一段折线内。简化起见，本条文根据 UHPC 的设计厚度计算出其底面的温度，并假设从 UHPC 层底面至钢主梁底面，截面的温度保持恒定。
- 5.7 本条规定与 JTG D64《公路钢结构桥梁设计规范》、JTG/T D64-01《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》对组合梁收缩徐变效应的计算思路一致，即混凝土收缩采用基于混凝土强度、龄期、收缩系数等因素的公式法计算，混凝土徐变则采用有效弹性模量方法。在超静定结构中，混凝土收缩徐变将引起结构内力重分布，故建议采用有限元方法等较为精确的分析方法计算组合梁收缩徐变效应。

6.1.2 本条是关于超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁安全等级的选用。表 9 中的安全等级划分是按照现行国家标准 GB 50153《工程结构可靠性设计统一标准》的相关规定，并考虑超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的特点给出的，与现行行业标准 JTG D60《公路桥涵通用设计规范》保持一致。

6.1.3 本条为强制性条文，给出了承载力极限状态计算的表达式，适用于本规程结构构件的承载力计算。

6.2.1 不同的施工方法和顺序可能造成结构各部分构件受力状态的不同，在计算超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁受力时，应考虑施工方法和顺序的影响，并对施工阶段进行抗弯验算，施工阶段组合效应应符合现行 JTG D60《公路桥涵设计通用规范》的规定。

6.2.2 采用弹性设计方法计算超高性能混凝土钢桥面铺装体系的抗弯承载能力，以截面上任意一点达到材料强度设计值为抗弯承载力的标志，相关计算符合 JTG/T D64-01《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》的相关规定。

6.2.3 超高性能混凝土钢桥面铺装体系的抗弯承载力计算应考虑剪力滞效应影响，考虑钢梁和 UHPC 层的有效宽度。

6.2.5 采用弹性设计方法计算超高性能混凝土钢桥面铺装体系的抗弯承载能力时，分别以钢梁、UHPC 层、钢筋达到抗拉或抗压设计值为抗弯承载力的标志，考虑桥梁结构重要性系数。

6.3.2 本节参考了 JTG/T D64-01《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》的相关规定。试验研究表明，受弯构件的剪力假定全部由钢梁腹板承受，计算组合结构竖向抗剪承载力时，计算结果偏于安全。UHPC 层对截面抗剪存在一定的贡献，其大小与采用的厚度有关。

当组合结构梁承受弯、剪共同作用时，组合梁抗弯承载力随截面所受弯矩的增大而减少，由于截面抗力计算基于弹性方法，因而以最大折算应力的方式考虑组合梁弯剪共同作用。

6.4.2 当超高性能混凝土钢桥面铺装体系的桥面结构采用闭口纵肋时，由于加劲肋的扭转刚度较大，无需验算其稳定性。但是当采用开口纵肋时，纵肋的抗扭刚度小，且其侧向约束仅来自于横隔板，若开口加劲肋的自由长度和总宽度之比超过了表 10 的限值，应进行整体稳定计算。

6.4.3 本条对处于负弯矩区的桥面结构的整体稳定性验算主要是侧扭失稳验算，在形成超高性能混凝土钢桥面铺装体系后桥面结构的侧扭失稳是一种介于钢梁局部失稳和整体失稳之间的失稳模式。对于侧向扭转屈曲计算方法，美国、日本等国规范均未给出具体规定，而是借用了钢梁侧扭稳定性的相关规定。欧洲规范 4 在大量研究工作的基础上，给出了考虑混凝土板侧向支撑和钢梁截面特征的组合梁侧扭失稳临界荷载计算方法，本规程对桥面结构的负弯矩区侧扭失稳的计算主要参考欧洲规范 4 的相关规定。

6.5.1 对大多数公路桥梁结构，汽车荷载是导致疲劳破坏的主要因素，故在本规程中对车辆荷载作用下的疲劳验算进行规定。

6.5.3 疲劳荷载计算模型 I、II 和 III 参考 JTG D64《公路钢结构桥梁设计规范》中的相关规定。疲劳荷载计算模型 I 对应于无限寿命设计方法，这种方法考虑的是构件永不出现疲劳破坏的情况。疲劳荷载计算模型 II 是根据交通运输部 2007 年下达的年度公路工程标准制修订项目《公路桥梁疲劳设计荷载标准》的研究结论给出的。疲劳荷载计算模型 III 是在欧洲规范疲劳荷载模型 3 的基础上修改车辆着地面积得到的。

疲劳荷载模型 II 和 III 加载仅按单车道加载，但在第 6.5.6 条和第 6.5.7 条已在损伤等效系数中考虑了多车道效应。

6.5.4 在疲劳荷载计算模型 I ~ III 中已考虑了行驶在良好状态路面上时形成的动力效应。但当车辆行驶接近伸缩缝时，应额外增加一个放大系数。

6.5.8 正交异性板各疲劳细节对车载不敏感，而仅对轮载敏感，且由于正交异性板各疲劳细节的有效面范围狭小，变化幅度大，因此疲劳细节还对轮载的横向位置十分敏感。计算方法应参考 JTG D64-2015 《公路钢结构桥梁设计规范》中的相关规定。

6.5.9 热点应力法考虑结构宏观几何特征的变化与焊接接头带来的结构不连续引起的应力集中效应，但不考虑焊缝处局部几何特征的变化引起的缺口效应。热点应力包含线性分布的膜应力与弯曲应力，而不包括缺口引起的非线性应力峰值。需要强调的是热点应力并不是结构的真实应力，而是假想出来的。严格来讲，热点应力法仅适用于对焊趾的评估，但结合疲劳试验也可以推广到包含焊根在内的其它潜在裂纹萌生点的评估中。

6.5.10 根据热点的位置，可以将热点分为两类：a 类位于板表面焊趾，b 类位于板边缘焊趾，采用不同的外推方法得到焊趾处的热点应力。

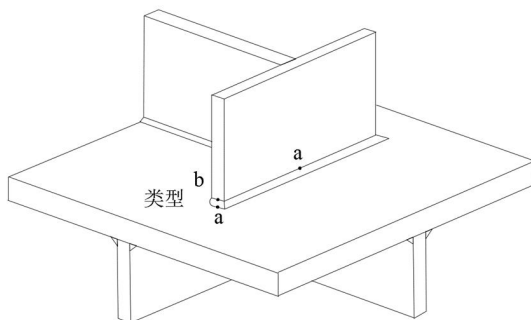


图 1 a 类、b 类热点示意图

7.1.1 公式 (33) 为持久状况正常使用极限状态的验算表达式。作用的效应组合一般为标准组合、频遇组合及准永久组合，不含安全等级决定的重要性系数；限值的取值源于工程实践的经验。

7.1.2 作用的组合规定与现行行业标准 JTG D60 《公路桥涵通用设计规范》、JTG D62 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》的相关规定保持一致。

7.1.3 设计应力验算一般均采用简便的初等材料力学方法，基本假定是在满足设计精度的前提下，规范的公式可采用初等材料力学公式。弹性计算时，不考虑钢与 UHPC 之间的滑移，认为完全连接。

7.1.4 本条文中，超高性能混凝土钢桥面铺装体系中的三个受力体系是参考了经典的正交异性钢桥面板受力体系的划分，详细可参考相关文献。

7.1.5 本条列出了正常使用极限状态设计计算时，除本规程外，尚需参考其它国家及行业相关规范。

7.2.1 本条文根据文献《Computer modeling and investigation on the steel corrosion in cracked ultra high performance concrete》(Rafiee A; 2012) 的研究结论，当裂缝宽度不超过 0.05mm 时，可认为裂缝对于 UHPC 的耐久性没有影响。

7.2.3 在超高性能混凝土钢桥面铺装体系中，要控制 UHPC 层的裂缝宽度，须对 UHPC 层进行配筋。试验研究表明，当钢桥面板厚 12mm，上铺 UHPC 层厚度为 50mm，纵横双向配筋直径为 10mm，净保护层 15mm，钢筋中心间距分别为 100mm、75mm、50mm 时，UHPC 层 0.05mm 裂缝宽度对应的名义弯拉应力如附录 E 所

示。

试验模型中钢桥面板的厚度偏保守地取为 12mm，而目前正交异性钢桥面中的钢桥面板厚度一般为 $\geq 14\text{mm}$ 。因此，在工程应用中，当钢桥面板厚度大于 12mm 时，可偏保守地，仍然采用本规程附录 E 进行设计。

7.2.2~7.2.3 条规定了 UHPC 开裂验算的基本计算方法，验算的步骤如下：

(1) 计算关注位置 UHPC 层在短期效应组合下的第一体系应力和标准车辆荷载作用下的第二、三体系应力，两者叠加得到名义弯拉应力计算值；

(2) 根据 UHPC 强度等级、是否为接缝及采用的钢筋间距，在附录 E 查出 UHPC 名义弯拉应力容许值；

(3) 将名义弯拉应力计算值与名义弯拉应力容许值比较，判读是否满足要求。

7.2.4 截面法向应力计算的基本假定是：

(1) UHPC 与钢桥面板连接为完全连接，不考虑滑移；

(2) 超高性能混凝土钢桥面铺装体系弯曲时，符合平截面假定。

计算截面法向应力时，一般采用弹性模量比的方法，将两种材料的截面折算成一种材料的截面，按照初等材料力学的公式计算。

在超高性能混凝土钢桥面铺装体系中，控制 UHPC 设计的主要是车轴荷载作用下，负弯矩区域的拉应力，尤其是位于钢主梁腹板、横隔板、纵隔板顶面位置的 UHPC 层。本条列出了计算中应该重点关注的有利位置。

7.3.1 超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的挠度控制是结构刚度控制的要求，预拱度设置是成桥行车平顺的要求，限值与现行行业标准 JTG D64《公路钢结构桥梁设计规范》一致。

8.1.1 按照公路桥梁设计惯例，除了计算构件承载能力外，还需要计算弹性阶段的构件应力。构件应力计算实质上是构件的强度计算，是对构件承载能力计算的补充。计算时作用（或荷载）取其标准值，汽车荷载应计入冲击系数，所有荷载分项系数均取为 1.0。

8.1.3 应力限值的取值源于工程实践经验，并与目前现行的相关规范基本一致。部分控制值作为强度验算的补充。

8.2.1 本节关于构件短暂状况的应力计算，实属构件弹性阶段的强度计算，施工荷载采用标准值组合，但有特殊规定者除外。

在施工中当利用已安装就位的构件进行吊装时，要对吊机（车）行驶其上的构件进行验算。这些构件都已作持久状况承载力计算，而吊机（车）系临时荷载，荷载系数取值较低，当其设计值产生的效应小于持久状况承载力的荷载设计值效应时，则可不进行验算。

9.1.2 超高性能混凝土钢桥面铺装体系中抗剪连接件宜采用栓钉，应保证 UHPC 层与钢主梁能有效地组合和共同承担荷载作用。

9.1.3 本条文的结合面滑移验算仅限于正常使用极限状态。滑移限值一般可考虑环境类别给出，在没有相关规定的情况下可取 0.2mm。

9.2.1 依据中铁大桥科学研究院有限公司推出试件的试验结果，UHPC 抗压强度一般较高，较难发生压碎破坏，推出试验破坏形式为栓钉剪坏。故单个栓钉连接件的抗剪承载力设计值应根据栓钉剪切破坏确定。

9.2.2 超高性能混凝土钢桥面铺装体系结构抗剪连接件的作用（荷载）仅包含钢主梁与 UHPC 板组合后的各种荷载。在整体作用纵桥向剪力计算时，按弹性理论假设钢主梁与 UHPC 板完全结合来计算，不计钢与混凝土间的粘结力及摩擦作用，不考虑负弯矩混凝土开裂的影响。桥面板由于混凝土收缩徐变和温度作用产生的剪力主要集中在主梁端部，剪力大小由梁段向跨中方向逐渐递减。

9.3.2 抗剪连接件疲劳验算细则应遵循本规程第 6.5 节的规定。应建立有限元计算模型，抗剪连接件的疲劳验算应分别计算总体荷载效应和局部荷载效应，计算整体荷载效应采用第 6.5 节中疲劳荷载 I 和 II，计算局部荷载效应采用第 6.5 节中的疲劳荷载 III，计算方法参考《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 中的相关规定。

9.4.2 一般而言，钢-混凝土组合结构中抗剪连接件有两种设计方法：弹性设计法和塑性设计法。其中塑性设计法假设当结构达到承载能力极限状态时，所有栓钉均应达到抗剪承载力，此时各栓钉的剪力趋于一致，该假设简化了计算过程，使得该方法应用更广泛。但是应用该方法的前提是，抗剪连接件应具有良好的延性。然而，超高性能混凝土钢桥面铺装体系中栓钉长度较短，刚度大，栓钉达到抗剪承载力时，各栓钉剪力差别较大。因此，本条建议采用弹性设计法来计算抗剪连接件的布置数量，而不建议采用塑性设计法。对于一般的钢-混凝土组合桥梁，弹性设计法首先计算桥梁在荷载组合下的剪力分布，然后结合单个抗剪连接件的抗剪承载力来计算不同区域的抗剪连接件数量。对于本规程的超高性能混凝土钢桥面铺装体系，其受力不同于一般的钢-混凝土组合桥梁，主要由局部荷载控制，应保证 UHPC 层在设计荷载下不会出现开裂。

9.4.3 UHPC 层底面的最大拉应力计算宜建立有限元局部模型，采用线弹性有限元模型。

10.1.2 本节规定了 UHPC 层及内部钢筋的布设标准和原则。UHPC 层中配置钢筋能够显著提高其抗裂性能。在受压区，宜选用 100mm×100mm 钢筋网，在受拉区及受力复杂区域加密至 50mm，以提高 UHPC 层抗裂性能。

10.2.1 《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 中：正交异性板钢桥面最小板厚度应符合如下规定：1) 行车道部分的钢桥面板顶板板厚不应小于 14mm，加劲肋的最小板厚不应小于 8mm。2) 人行道部分的钢桥面板顶板板厚不应小于 10mm。

结合超高性能混凝土钢桥面铺装体系的结构特点，UHPC 层对桥面结构的刚度有一定贡献，钢桥面板可以适当减小。故规定为 12mm。

10.2.3 栓钉的设置优劣直接关系到 UHPC 层与钢桥面板之间的连接性能，进而影响桥面铺装体系的结构性能。在满足 UHPC 层与钢桥面之间连接受力要求的前提下，栓钉的布置应满足一定的构造要求，防止因栓钉布置不合理造成 UHPC 与钢桥面板连接失效。

10.3.1 接缝是超高性能混凝土钢桥面铺装体系的薄弱区域，其抗裂性能相对于非接缝区低一些，应避免将其设置在拉应力区，宜将其设置于压应力区，防止运营期开裂。接缝形式需兼顾施工便易性和传力可靠性，方波式接缝和钢筋错开排列能够满足这两项要求。

10.3.2 当接缝形式采用除方波式接缝外的其它特殊接缝结构时，应进行专题研究。

10.4.1 超高性能混凝土钢桥面铺装体系的面层可选用较多种类的柔性铺装材料。可以根据面层厚度选择合适的铺装材料，如面层厚度小于 20mm 时，可选用环氧薄层、同步碎石封层等铺装层。面层厚度超过 20mm 时，可选用沥青玛蹄脂碎石混合料（SMA）、沥青混凝土（AC）等铺装层。

11.2.1 施工组织设计应科学、全面、具体，并对施工中可能出现的紧急情况有预案。设备进场前，应

检查并落实桥梁施工现场的供水、供电情况，确保开工条件完备；设备进场后，在施工前应完成各施工设备的安装、调试工作，尤其是栓钉焊机、UHPC搅拌机和摊铺机、振动梁等重要设备。

11.12.1 风速越大，UHPC表面失水越快，塑性收缩开裂的风险越高，因此UHPC层施工完一个节段后要及时进行保湿养生。

A.4 试件形状与尺寸设计参照CECS 13-2009《纤维混凝土试验方法标准》第6.7条“轴心抗拉强度和受拉应力-应变全曲线试验”。为避免浇筑试件时出现因变截面处收缩变形受到约束而过早出现裂缝的现象，试验采取分两次浇筑的方法制作UHPC轴拉试件。